

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.022

紫外线辐照技术去除藻类的研究进展

贾沛莉,陈诗雯,代瑞华

(复旦大学环境科学与工程系,上海 200433)

摘要:结合国内外相关文献,综述了紫外线辐照对不同典型藻类的影响、紫外线辐照除藻技术的发展利用现状,并分析了紫外线辐照技术除藻的机理,以期后续深入研究和推广利用提供理论依据。

关键词:紫外线;藻类水华;藻毒素;光合活性;抗氧化酶

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2017)05-0138-07

Research progress of removing algae by ultraviolet irradiation

JIA Peili, CHEN Shiwen, DAI Ruihua

(Department of Environmental Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: This paper combined the relevant literature at home and abroad and reviewed the influence of ultraviolet irradiation on the different typical algae as well as the development and present situation of removing algae by ultraviolet irradiation. Besides, its mechanism was also analyzed and was expected to provide theoretical basis for subsequent research and wide application.

Key words: ultraviolet; algal bloom; algal toxins; photosynthetic activity; antioxidant enzyme

近年来,水体富营养化引发的藻类水华问题已成为水资源环境领域面临的重要挑战之一。美洲、东亚、西欧等相继报道了藻类水华的发生^[1-4],而在我国,滇池、太湖、巢湖等天然湖泊、城市供水水库以及武汉东湖、南京玄武湖等景观湖泊都出现了藻类水华现象^[5-8]。藻类水华不仅对饮用水源水和景观水体造成污染,增加了水体的治理和维护成本,而且使得水生态环境失衡,某些产毒的藻类在生长和消亡过程中会释放藻毒素,造成鱼类等水生生物大量死亡,人类和其他生物的安全也受到严重威胁。

目前,藻类的控制方法主要有物理、化学、生物3个方面的方法^[9-11],不同方法能不同程度地去除藻类,但在除藻效率、灭藻专一性和对藻毒素、胞内

外聚合物的释放控制以及经济可行性等诸多方面存在不同程度的差异。物理除藻技术通过过滤、气浮、吸附等手段将藻类从水体中去除,效果显著,无污染,但费用高、工作量大、周期长,如被广泛应用的活性炭除藻技术,除藻效果较好,但用量大且易发生活性炭泄露等情况^[12]。化学除藻技术见效较快,但长期投加药剂会引发二次污染,不可避免地造成环境污染和生态失衡,既不科学也不经济,如高锰酸钾预氧化除藻技术,能有效控制有毒副产物,但水体中残留的锰离子易导致水体二次污染^[13];硫酸铜也常被用来控制水华藻类,但在应用过程中存在毒性大、重金属污染、破坏藻细胞使藻毒素外泄等一系列问题^[14]。生物除藻技术利用藻类病原菌、病毒或食藻

基金项目:环境模拟与污染控制国家重点联合实验室(中国科学院生态环境研究中心)开放基金(15K03ESPCR);国家自然科学基金(51678159)

作者简介:贾沛莉(1992—),女,硕士研究生,研究方向为水源水藻类治理。E-mail:15210740024@fudan.edu.cn

通信作者:代瑞华,副教授,博士。E-mail:rh dai@fudan.edu.cn

的鱼来抑制和杀灭藻类,成本投入低,且能够持续降低水体中的营养盐,从而在源头上控制藻类水华^[15],但在技术上不成熟,实施起来有较大难度,且藻毒素能够通过食物链富集,可能给人体带来潜在危害,因而能否在实际运用中大力推广存在争议。虽然有众多的除藻技术,藻类水华的季节性暴发却一直威胁着水质安全,如何安全、高效且经济地去除水体中的藻类是国内外研究热点。

紫外光(Ultraviolet,以下简称UV)是一种具有穿透力和杀伤力的光波辐射,它在水环境中的应用最先是在自来水管的消毒处理中^[16],因其具有无污染、低成本、高效率、杀菌范围广且不改变水的成分等其他消毒手段无法比拟的优势^[16-17],在水处理领域得到迅速推广。经过多年发展,UV消毒工艺逐渐完善和稳定,现已逐渐成为西方发达国家的一种主流消毒手段。UV在除藻领域的应用同样引起了人们的浓厚兴趣。UV辐照除藻一般指利用波长在200~400 nm的紫外光,达到对藻的灭活及对藻毒素和胞内外有机物释放的有效控制的目的。与B波段紫外光(UV-B,280~315 nm)和A波段紫外光(UV-A,315~400 nm)相比,C波段紫外光(UV-C,200~280 nm)更容易被藻细胞吸收,对藻细胞的作用力更强,在研究及实际应用中涉及最广泛。本文主要从3个方面概述国内外UV辐照除藻技术的研究进展:①UV辐照灭活藻类的研究进展;②UV辐照与其他方法联用除藻研究进展;③UV辐照除藻机理研究,以期对我国除藻技术的后续研究和推广利用有所裨益和启发。

1 UV辐照灭活藻类的研究进展

1.1 UV辐照对不同藻类的影响

铜绿微囊藻是一种常见的典型蓝藻,是夏季水华暴发的优势藻种,因此成为除藻的研究热点。UV辐照能够抑制铜绿微囊藻细胞生长,降低藻密度。不同剂量的UV辐照对铜绿微囊藻的抑制有一定的差异。周明等^[18]以浸没式UV-C技术(将UV-C辐照系统放入藻液培养基中约20 cm处)对铜绿微囊藻进行辐照处理,结果表明,UV-C辐照使得微囊藻密度迅速降低,从对数期直接进入衰亡期,中间几乎不经过稳定期,可能是因为UV-C辐照作用使藻细胞失活,抑制其继续生长。Alam等^[19]的实验也发现将辐照后的藻进行正常培养时,对照组(无UV辐照)的藻密度从 5.4×10^4 个/mL增加到 1.0×10^6 个/mL,实验组经37 mJ/cm²UV-C辐照,藻密度相比于对照组减小了25%;当辐照剂量增加到150 mJ/cm²时,正常培养7 d后藻全部死亡。由此看

出,不同剂量的辐照对铜绿微囊藻的作用效果差异较大,加大辐照剂量会增强铜绿微囊藻的抑制和灭活效果。刘玲静等^[20]发现50~100 mJ/cm²UV-C辐照对铜绿微囊藻生长的抑制期为2~4 d,100 mJ/cm²辐照会使得叶绿素a的浓度减量37%~60%。Sakai等^[21]发现,30~60 mJ/cm²辐照剂量没有明显抑制效果,90~180 mJ/cm²辐照剂量有10 d的抑制效果。此外,袁侃等^[22]对UV辐照抑制铜绿微囊藻生长做了动态实验研究,发现31~50 mJ/cm²UV-C辐照对铜绿微囊藻有9 d的抑制效果,这与刘玲静等^[20-21]的研究结果相差较大。这种差异可能与实验条件不同有关,袁凯等^[22]采用的是推流式反应器,研究的是在动态条件下UV-C辐照对铜绿微囊藻生长抑制效果,其他人则是在静态条件下完成的实验,此外,Sakai等^[21]则采用中压和低压汞灯进行实验,而Alam等^[19]采用水面式低压汞灯进行UV-C辐照,这些实验条件的不同可能影响每个藻细胞接收到的UV辐照剂量的不同,进而影响实验结果。

除铜绿微囊藻外,UV辐照对其他几种常见的藻类也有影响。毕海^[23]通过比较钝顶螺旋藻和斜生栅藻,发现尺寸较小的球状藻类被UV辐照抑制程度要强于尺寸较大的丝状藻类。陶益^[24]利用椭圆小球藻、普通小球藻和斜生栅藻,研究了不同藻密度条件下UV-C辐照的影响,发现UV-C辐照对藻细胞的抑制效果与辐照剂量有关,而与初始藻密度无关,UV-C辐照使这3种藻生长速率变缓,但无致死影响,说明这些藻类对UV-C辐照的敏感性显著低于铜绿微囊藻。这可能与藻类色素组成有关,以铜绿微囊藻为代表的蓝藻细胞,是以水溶性色素藻胆蛋白为主要的捕光色素,绿藻则以脂溶性色素叶绿素为主要的捕光色素,而UV-C辐照处理对水溶性色素的损伤显著高于脂溶性色素。雷中凯^[25]发现几种藻类对UV辐照的敏感程度:水华鱼腥藻>针杆藻>铜绿微囊藻>浮游颤藻>普通小球藻>斜生栅藻,由此也可看出,硅藻(针杆藻)和蓝藻(铜绿微囊藻和水华鱼腥藻)对于UV辐照的敏感性显著高于绿藻,推测可能与藻细胞结构有关,不同藻类的藻细胞壁的成分和薄厚、藻细胞的大小和形状各不相同,因此对于UV辐照的透过性存在差异。如,硅藻细胞壁中含有较多的二氧化硅组分,对UV的透过性高,高能量的UV能够直接进入藻细胞引起损伤。上述结果表明,不同藻类的藻细胞壁结构与厚度、藻细胞形状与尺寸、藻细胞内含色素等因素均能影响UV-C辐照灭活藻类的效果。

UV辐照能够增大藻细胞比重,破坏藻细胞完整性,从而加速藻的沉降。Alam等^[19]发现,当UV-

C 辐照剂量分别为 37 mJ/cm²、75 mJ/cm²、150 mJ/cm²时,都能使得超过 50% 的藻细胞沉降在孵化管的底部,通过测定发现沉降藻的比重增大,且辐照剂量越大,沉降比例越大。显微镜观察后发现辐照后的藻细胞出现畸变、破裂,有的失去游动力,长时间的辐照甚至使得细胞解体,藻细胞死亡^[26]。毕海^[23]在后期实验中进一步证明 UV 辐照会对单个藻细胞产生全方位的伤害,藻细胞断开、破裂、内含物溶出,从而加强藻种群的沉降性能,加速了沉降过程。UV 辐照后藻细胞发生沉降,这对于湖泊和水库中的藻类去除具有重要意义,但是过量的辐照会使藻细胞破裂,胞内有机物外泄、消毒副产物升高,对水体安全产生其他影响,这方面问题有待进一步研究。

UV-C 辐照不仅能破坏藻细胞完整性、抑制藻类生长,也能影响藻细胞产毒等生理活动。Sakai 等^[27]通过铜绿微囊藻和鱼腥藻的对比,建立了 UV 辐照后藻毒素释放的动态模型,在 UV 辐照对藻产毒的影响方面做了一定的研究。实验表明,辐照后正常培养 14 d 的过程中,无 UV 辐照水中的藻毒素含量持续增加;低剂量 UV 辐照组水中藻毒素含量变低;高剂量辐照后藻毒素含量最低。他认为,藻毒素是一种天然环肽化合物,只能通过主动运输的方式通过细胞膜,水中的藻毒素只能来源于藻类凋亡后的胞内藻毒素外泄。因此,辐照组中 UV 辐照降低了胞内藻毒素含量,从而降低了外界水中的藻毒素含量,而且当辐照剂量增加到一定值时,UV 对于藻毒素具有直接分解作用,因此高剂量辐照后,水中藻毒素含量最低。UV 辐照后,藻毒素随着藻密度的降低而缓慢释放,不会出现水体中藻毒素瞬间大量增加的情况^[28]。UV 辐照对藻毒素的控制和降解作用,成为 UV 辐照除藻的优势。

以上研究表明,UV 辐照对不同藻类的生长均有抑制效果,对铜绿微囊藻的作用效果最显著,对钝顶螺旋藻、椭圆小球藻、普通小球藻、斜生栅藻、鱼腥藻等其他典型藻类都有灭活作用。通过抑制藻细胞生长、降低藻密度、破坏藻细胞完整性、增大藻细胞比重使藻沉降在底部等作用,达到除藻的效果,同时,UV 辐照能够影响藻细胞产毒,降低藻毒素含量。UV 辐照剂量、藻细胞结构、藻细胞内含色素等因素均能影响 UV-C 辐照灭活藻类的效果。因此,探究不同藻类最佳的 UV 辐照剂量,选取最佳的辐照时机,在藻类水华暴发之前,对可能出现藻类水华的水体进行 UV 辐照,这种 UV 辐照除藻技术可能成为非常有效的控制藻类生长尤其是抑制小型湖泊水华的重要手段。

1.2 UV 辐照除藻技术的推广应用

UV 辐照除藻技术的推广应用经历了实验室静态条件研究、现场试验和实际应用 3 个阶段。

UV 辐照除藻的实验室静态条件研究始于 20 世纪 90 年代, Kawabata^[29]率先将 UV 用于灭活水体中初始浓度为 3.6×10^4 个/mL 二角多甲藻,发现 144 mJ/cm² 的 UV 辐照剂量可将其全部杀死。自此之后,UV 辐照对藻的灭活效果引起了人们的广泛兴趣,国内外学者进行了大量实验室静态条件研究。

随后 UV 辐照除藻的现场试验在水库和自来水厂展开。日本学者^[30]曾采用 30 W 的 UV-C 灯管作为光源,辐照一个 4 m×4 m×5 m 的围隔空间,用来杀灭该空间上层水体中二角多甲藻,结果发现藻在 2 d 后全部死亡。2003 年周明等^[18]将 12 支 30 W 的紫外灯管用于自来水厂斜管沉淀池中,发现沉淀池中的藻密度迅速下降,经 4 次处理后,沉淀池中的藻不再明显生长,因而不必频繁地冲洗池子,减少了自来水厂的运行成本。现场试验充分证明了 UV-C 辐照在实际水体中具有杀藻效果,适合于水处理工艺。

在实际应用中,Iseri 等^[31]首次将 UV-C 反应器置于船上,用于杀灭二角多甲藻水华,当初始藻密度为 5×10^3 个/mL 时,20 s 的辐照处理能杀灭全部细胞;当生物量增为 1.0×10^4 个/mL 时,50 s 的辐照处理能杀灭 90% 细胞。2004 年,船载 5 根 12 W 灯管的 UV-C 反应器,用于杀灭日本内海的卡盾藻赤潮,仅 40 s 的辐照处理能杀灭 80% 藻细胞^[32]。由此可见,UV 辐照除藻在实际水体中能取得理想的效果。

在我国,UV 辐照除藻技术仅在自来水厂中有过初步尝试,在湖泊、水库等可能暴发水华的水体中实际应用较少,因此探究 UV 辐照对这些水体中藻类的最佳作用时间、最佳作用剂量和适宜的作用方式,并进行推广,是十分必要的。

2 UV 辐照与其他技术联用除藻研究进展

2.1 UV 与纳米二氧化钛 (TiO₂) 联合除藻

纳米二氧化钛 (TiO₂) 是一种对自然环境无害、化学性能稳定、成本低廉、光催化活性高的材料,在环境污染治理领域应用广泛。UV-C 与纳米 TiO₂ 联合除藻,主要是利用 UV-C 作为反应光子,发生纳米 TiO₂ 光催化反应,利用纳米 TiO₂ 材料的强氧化性,使藻细胞产生氧化损伤,光合效率和呼吸速率降低,从而达到去除藻类的效果^[33]。

廖兴盛等^[34]探究了 UV-C 照射下纳米 TiO₂ 光催化对蓝藻生长的影响,通过对蓝藻的细胞数目、叶绿素 a 浓度、藻蓝蛋白浓度、光合放氧速率等参数的测定,发现一定剂量的 UV-C 辐照能使得鱼腥藻细

胞接近完全死亡,并且 UV-C 联合纳米 TiO_2 光催化工艺对藻生长的影响比单独的 UV-C 处理更有效,能对蓝藻水华进行有效的治理,并提出 UV-C 光催化反应对蓝藻细胞光合作用系统的破坏和细胞膜的脂质过氧化为蓝藻生长抑制的主要原因。此外,UV-C 催化纳米 TiO_2 能够促进蓝藻体内活性氧物质 (reactive oxygen species, ROS), 如 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 H_2O_2 的产生,加剧受试蓝藻的损伤,从而缩短蓝藻的 UV 辐照处理时间^[35]。由此可见,UV-C 催化纳米 TiO_2 在控制蓝藻水华、消除蓝藻水华对环境的危害方面具有较好的应用价值。

2.2 UV 与过氧化氢 (H_2O_2) 联合除藻

郭建伟等^[36]对比了 UV 辐照技术与单独投加 H_2O_2 除藻技术,结果发现 UV 的灭活相对比较缓和,UV 能使藻的生长活性减弱,但并不会导致大量藻细胞迅速死亡;投加 H_2O_2 的灭活效果比较显著,对藻细胞的破坏程度大,但随着氧化剂的消耗和分解,后期灭活效果逐渐降低;而且 H_2O_2 分子较难进入细胞内部,增大投加量后并未取得更高的灭活效果。同时 H_2O_2 的氧化能力不足以破坏藻毒素 (Microcystin-LR, MC-LR) 的化学键,对藻毒素等物质的降解能力较差。

由此可见,UV 辐照和 H_2O_2 工艺除藻各有所长,因而两者联用除藻技术应运而生。景江等^[37-39]采用 $648 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ UV-C 辐照与 $1 \text{ mmol}/\text{L}$ H_2O_2 联用,处理鱼腥藻细胞,发现 3 d 内藻密度迅速降低,可能是 UV/ H_2O_2 产生氧化胁迫损伤藻细胞,而且随着 UV 辐照剂量或 H_2O_2 浓度的升高,与藻细胞光合作用相关的基因转录表达量和胞内藻毒素的合成受到抑制,同时该组合能更高效地降解藻毒素 Microcystin-RR (MC-RR)。这与 He 等^[40]的实验结果相似,他们发现 UV-C 辐照与 H_2O_2 联用对 MC-LR 的去除率达到 93.9%。

H_2O_2 作为氧化剂,本身能灭活藻细胞,对藻细胞破坏能力强,但对藻毒素几乎无降解作用,而 UV 辐照除藻较为温和,且一定剂量的 UV 辐照能够降解并抑制藻毒素的释放。UV-C 与 H_2O_2 联用,两种方法发挥各自所长,具有强氧化能力的 $\cdot\text{OH}$ 能够直接通过 UV-C 辐照刺激 H_2O_2 分解产生,既控制了藻类生长,又有效抑制和分解藻毒素。由此可见两者的联用是一种很有前途的除藻工艺,但目前仅限于研究阶段,未在实际水体中推广。

2.3 UV 与表面修饰聚乙烯亚胺 (PEI) 的磁性纳米颗粒 (MNPs) 联合除藻

四氧化三铁磁性纳米颗粒 (MNPs) 在地壳中含量丰富、无毒无害、具有较大的比表面积且可重复利

用,它能够黏附在藻细胞上,从而使藻细胞带有磁性,在外加磁场的作用下达达到除藻的效果。但是传统的 MNPs 在水中不溶解,易发生凝聚和沉淀,因此,需要一种表面修饰剂来稳定 MNPs 在水中的分布,降低 MNPs 分子之间的相互吸引。其中最为常见的表面修饰剂是聚乙烯亚胺 (PEI)。UV 与表面修饰剂 PEI 的四氧化三铁 MNPs (PEI-coated MNPs) 联用去除二形栅藻时,相对于单独的 MNPs 和单独的 PEI-coated MNPs,UV 显著提高了藻的去除率以及 MNPs 的稳定性和再生性^[41]。究其原因,Barhoumi 等^[42-44]认为 UV 能够刺激 PEI-coated MNPs 的表面产生 ROS,ROS 能无选择性地氧化胞外有机物 (extracellular organic matter, EOM),因此改变藻细胞表面活性,增强藻细胞的絮凝,提高去除效率。

除了上面提及的联用技术,活化的过硫酸盐也是常用的高级氧化水处理技术。Wang 等^[45-46]研究了 UV 辐照与过硫酸盐联合除藻,发现 UV 能使藻细胞表面有机物脱落,藻粒径变小,UV 辐照过硫酸盐能产生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\text{HO}\cdot$ 等,它们破坏了藻细胞的完整性,影响了 Zeta 电位,是高效除藻的关键。该联合工艺虽然不可避免地造成细胞破裂,且存在处理时间长、经济成本高等问题,但相对于单独的 UV-C 辐照除藻工艺,加入过硫酸盐能使得藻细胞去除率达到 98.2%,且能有效控制消毒副产物前驱物。

综上,相对于单独的 UV 辐照除藻技术,UV 与纳米 TiO_2 、 H_2O_2 和 PEI-coated MNPs 等方法联用的除藻技术,能够扬长避短,获得更高的除藻效率。UV-C 辐照与 H_2O_2 联用时能大大降低水中 MC-LR 和 MC-RR 的含量,在饮用水安全方面具有较好的优异性,但在实际应用中 H_2O_2 成本较高,因此探究该联合除藻工艺与其他常见混凝剂一起作用时,在考虑经济性的同时达到较好的去除效果非常必要。其次,UV 与其他物理、化学等除藻技术联用,如 UV 辐照与混凝强化除藻、UV 辐照与活性炭联用除藻等,能否取得更佳的效果,值得深入研究。

3 UV 辐照除藻机理

3.1 UV 辐照对藻细胞 DNA 的影响

DNA 对 UV 有一定的吸收特性,过量 UV 辐照会引起藻细胞 DNA 损伤。DNA 作为遗传物质的载体,其损伤会引发多种细胞反应,包括 DNA 修复、细胞周期延迟或阻滞、细胞凋亡等,这必将对藻的生理活动造成严重影响^[45]。

UV-C 辐照抑制了铜绿微囊藻编码基因的转录过程,从而影响蛋白的合成。UV-C 辐照还能使鱼

腥藻藻细胞 DNA 出现嘧啶二聚体,使藻细胞不能复制增值。唐学玺等^[44,46-47]发现了 UV-B 对三角褐指藻、赤潮异弯藻、亚历山大藻和中肋骨条藻 DNA 的损伤作用,随着 UV-B 辐照剂量的提高,DNA 损伤程度提高,当 UV-B 辐照去除后,损伤 DNA 可明显恢复。综上可知,UV-C 和 UV-B 辐照都能对藻类的 DNA 有不同程度的损伤。

3.2 UV 辐照对藻细胞光合活性的影响

UV 辐照能够降低与光合作用相关的物质的含量,如叶绿素、藻蓝蛋白等,从而降低光合作用活性。周明等^[18]通过生长曲线、细胞形态、叶绿素 a 含量以及藻蓝蛋白等指标,研究了 UV-C 抑藻机理,发现对铜绿微囊藻,UV-C 辐照能使藻细胞叶绿素 a 浓度呈递减变化,藻蓝蛋白发生变性降解。景江等^[37]也发现,对于鱼腥藻,UV-C 辐照能使叶绿素 a、类胡萝卜素、藻蓝蛋白含量大幅降低,从而降低光合速率。Sakai 等^[27]验证了这一机理,他们通过氧释放速率来衡量藻细胞光合活性,发现 UV-C 辐照会使光合活性立即降低,并在之后 7 d 的正常培养过程中持续降低。藻细胞光合活性的降低,损害了细胞正常的新陈代谢,是藻密度降低、藻生长抑制的主要原因。

3.3 UV 辐照对抗氧化酶的影响

藻在进化过程中形成了一整套完整的抵抗外界不良因素的抗氧化酶系统,包括超氧化歧化酶 (super oxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等。藻在正常成长时,抗氧化酶系统会消除由外界原因生成的过量氧自由基,从而使体内的自由基代谢处于动态平衡中,但是当藻细胞处于过量 UV 环境中时,抗氧化酶系统崩溃,使得表征藻细胞活性的 SOD、POD 和 CAT 的活性在短时间内下降^[48]。UV-C 辐照还能引起藻细胞内 ROS 含量升高,内氧化压力增大,胞内藻毒素含量降低^[24]。

可见,UV 辐照灭活藻类的主要机理是:UV 辐照能引起 DNA 损伤,抑制编码基因的转录和蛋白的合成;破坏脂溶性色素,使光能的捕获和传递过程受阻,降低藻细胞的光合作用,导致细胞生长所需的能量和有机物供应不足;影响藻细胞的生理代谢活性;破坏抗氧化酶系统,积累活性氧物质,使得内氧化压力增大,直接导致藻细胞的死亡^[24]。

4 结 语

UV 辐照对不同藻类均有灭活效果,对铜绿微囊藻的作用效果最显著;通过抑制藻细胞生长、降低藻密度、破坏藻细胞完整性、增大藻细胞比重、使藻

沉降在底部等,达到除藻的效果;UV 辐照能够影响藻细胞产毒,直接降解胞内藻毒素。相对于单独的除藻技术,一方面,UV 与纳米 TiO₂ 等的联用技术能取得更佳的除藻效果,但也存在经济成本高、对藻毒素的控制效果有限等问题,因而 UV 辐照联合除藻技术有待进一步探索和完善;另一方面,目前对 UV 辐照与其他物理除藻、化学除藻等除藻技术联用时的强化混凝除藻情况尚无太多研究。UV 辐照除藻过程中对藻细胞内外有机物的控制、沉降的藻细胞的后续处理等值得深入探讨。UV 辐照除藻技术具有无二次污染等众多优势,在实际水体中的推广应用非常必要。

参考文献:

[1] CARMICHAEL W. A world overview: One-hundred-twenty-seven years of research on toxic cyanobacteria-Where do we go from here? [C]// Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs. New York:Springer,2008: 105-125.

[2] PARSONS M L,DORTCH Q. Sedimentological evidence of an increase in pseudo-nitzschia (*Bacillariophyceae*) abundance in response to coastal eutrophication [J]. Limnology and Oceanography,2002,47(2): 551-558.

[3] NAKANO K, LEE T J, MATSUMURA M. In situ algal bloom control by the integration of ultrasonic radiation and jet circulation to flushing[J]. Environmental Science & Technology,2001,35(24): 4941-4946.

[4] MAATOUKI, BOUAICHA N, FONTAN D. Seasonal variation of microcystin concentrations in the Saint-Caprais reservoir(France) and their removal in a small full-scale treatment plant [J]. Water Research, 2002, 36 (11): 2891-2897.

[5] 盛虎,郭怀成,刘慧,等. 滇池外海蓝藻水华暴发反演及规律探讨[J]. 生态学报,2012,32(1): 56-63. (SHENG Hu, GUO Huaicheng, LIU Hui, et al. Reversion and analysis on cyanobacteria bloom in Waihai of Lake Dianchi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (1): 56-63. (in Chinese))

[6] 刘聚涛,杨永生,姜加虎,等. 太湖蓝藻水华灾害风险分区评估方法研究[J]. 中国环境科学,2011, 31 (3): 498-503. (LIU Jutao, YANG Yongsheng, JIANG Jiahu, et al. Risk evaluation method of cyanobacteria bloom hazard in Taihu Lake[J]. China Environmental Science,2011,31 (3): 498-503. (in Chinese))

[7] 王雪蕾,王新新,朱利,等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布烟感解析[J]. 中国环境科学,2015, 35 (5): 1511-1519. (WANG Xuele, WANG Xinxin, ZHU Li, et al. Spatial analysis on diffuse pollution and algal bloom characteristic with remote sensing in Chao Lake

- Basin[J]. China Environmental Science, 2015, 35(5): 1511-1519. (in Chinese))
- [8] 赵大勇,马婷,曾巾,等. 南京玄武湖富营养化及重金属污染现状[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 83-87. (ZHAO Dayong, MA Ting, ZENG Jin, et al. Study on eutrophication and heavy metal pollution of Xuanwu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 83-87. (in Chinese))
- [9] 刘丽娟,汪琳,李明玉,等. 不同混凝剂强化除藻、除浊的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5): 80-83. (LIU Lijuan, WANG Lin, LI Mingyu, et al. Removal of algae and turbidity from lake water by several coagulants[J]. China Water and Wastewater, 2010, 26(5): 80-83. (in Chinese))
- [10] 张龙,乔俊莲,雷青. 高锰酸钾预氧化强化混凝去除绿藻的研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 73-78. (ZHANG Long, QIAO Junlian, LEI Qing. The study of green algae removal by potassium permanganate pre-oxidation enhanced coagulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 73-78. (in Chinese))
- [11] 古励,郭显强,丁昌龙,等. 藻源型溶解性有机氮的产生及不同时期藻类有机物的特性[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2745-2753. (GU Li, GUO Xianqiang, DING Changlong, et al. Formation of algae-derived DON and characterization of algae organic matter (AOM) from different stages[J]. China Environmental Science, 2015, 35(9): 2745-2753. (in Chinese))
- [12] 王刚,陈杰琰. 水体藻类污染去除方法研究进展[J]. 水处理技术, 2010, 36(9): 16-20. (WANG Gang, CHEN Jierong. New progress in removal method of algae contamination in water[J]. Water Treatment Technology, 2010, 36(9): 16-20. (in Chinese))
- [13] 吕乐,尹春华,许倩倩,等. 环境有效微生物菌剂治理蓝藻水华研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 1-5. (LYU Le, YIN Chunhua, XU Qianqian, et al. Cyanobacterial bloom control by environmental effective microorganisms [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(8): 1-5. (in Chinese))
- [14] 陈孝花,潘连德,张饮江. 水中丝状藻类有害藻华的形成与对策[J]. 南方水产, 2011, 7(2): 77-82. (CHEN Xiaohua, PAN Liande, ZHANG Yinjiang. Formation and countermeasures of harmful filamentous algae in water [J]. South China Fisheries Science, 2011, 7(2): 77-82. (in Chinese))
- [15] 向伦宏,范荣桂,龚心雨,等. 蓝藻治理技术研究进展[J]. 辽宁化工, 2015(8): 44. (XIANG Lunhong, FAN Ronggui, GONG Xinyu, et al. Research progress in treatment technologies of cyanobacteria [J]. Liaoning Chemical Industry, 2015(8): 44. (in Chinese))
- [16] 罗凡,董滨,何群彪. 饮用水消毒技术的应用及其研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 393-396. (LUO Fan, DONG Bin, HE Qunbiao. Application and research progress on drinking water disinfection technology [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(12F): 393-396. (in Chinese))
- [17] 张欣. 污水处理中的紫外线消毒技术[J]. 给水排水, 2002, 28(11): 31-34. (ZHANG Xin. Ultraviolet disinfection technology of sewage treatment[J]. Water & Waste Engineering, 2002, 28(11): 31-34. (in Chinese))
- [18] 周明,董金荣,赵开弘. 浸没式 UV-C 技术对铜绿微囊藻生长的抑制效应[J]. 华中师范大学学报, 2003, 37(4): 549-552. (ZHOU Ming, DONG Jinrong, ZHAO Kaihong. Preliminary studies on diversity of fishes in the plucking seeds base of Hongmenchong [J]. Journal of Central China Normal University, 2003, 37(4): 549-552. (in Chinese))
- [19] ALAM M, OTAKI M, FURUMAI H, et al. Direct and indirect inactivation of *microcystis aeruginosa* by UV-radiation[J]. Water Research, 2001, 35(4): 1008-1014.
- [20] 刘玲静,陶益,雷中凯,等. UV-C 辐照对延滞期 6 种微藻生长抑制效果[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(7): 1-5. (LIU Linjing, TAO Yi, LEI Zhongkai, et al. Suppression effects of UV-cirradiation on growth of six micro-algal species in lag phase [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(7): 1-5. (in Chinese))
- [21] SAKAI H, KATAYAMA H, OGUMA K, et al. Kinetics of *microcystis aeruginosa* growth and intracellular microcystins release after UV irradiation [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(3): 896-901.
- [22] 袁侃,毛献忠,陶益,等. UV-C 辐照抑制铜绿微囊藻生长的动态实验研究[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 310-317. (YUAN Kan, MAO Xianzhong, TAO Yi, et al. Dynamic experiment on controlling of *microcystis aeruginosa* by UV-Cirradiation [J]. Environ Sci, 2010, 31(2): 310-317. (in Chinese))
- [23] 毕海. 紫外辐照技术抑制藻类实验及机理研究[D]. 北京:清华大学, 2002.
- [24] 陶益. UV-C 辐照对典型藻类生长抑制效果与机理研究[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [25] 雷中凯. UV-C 辐照抑制典型藻类生长的效果研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [26] 周明,董金荣,包广甸,等. 浸没式 UV-C 技术用于自来水厂除藻的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 111-113. (ZHOU Ming, DONG Jinrong, BAO Guangxun, et al. Alga-killing in water works with submerged UV-C technology [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2004, 32(6): 111-113. (in Chinese))
- [27] SAKAI H, OGUMA K, KATAYAMA H, et al. Effects of low or medium-pressure ultraviolet lamp irradiation on *microcystis aeruginosa* and *anabaena variabilis* [J]. Water

- Research,2007,41(1): 11-18.
- [28] SAKAI H, OGUMA K, KATAYAMA H, et al. Effects of low or medium-pressure UV irradiation on the release of *intracellular microcystin* [J]. Water Research, 2007, 41(15): 3458-3464.
- [29] KAWABATA Z. Effect of ultraviolet radiation on the survival of the dinoflagellate peridinium bipes causing freshwater red tide in reservoirs [J]. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 1990, 26(2): 17-22.
- [30] KAWABATA Z, ISERI Y, SASAKI M. Suppression of dinoflagellate peridinium bipes bloom in a mesocosm by ultraviolet radiation [J]. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 1991, 27(2): 7-10.
- [31] ISERI Y, KAWABATA Z, SASAKI M. Development of a boat equipped with UV lamps for suppression of freshwater red tide in a reservoir [J]. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 1993, 29(2): 61-70.
- [32] ISERI Y, NAKAMICHI M, MAEDA T. Development of a red tide control ship equipped with a UV irradiation system-preliminary and field experiments on harmful marine algae [C]// MTS/IEEE Techno-Ocean'04. New York:IEEE,2004: 1787-1792.
- [33] HONG Jinglan, OTAKI Masahiro. Association of photosynthesis and photocatalytic inhibition of algal growth by TiO_2 [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(2): 185-189.
- [34] 廖兴盛,汪星,赵开弘,等. UV-C 光催化纳米 TiO_2 对蓝藻生长影响的研究 [J]. 武汉植物学研究, 2007, 25(5): 457-46. (LIAO Xingsheng, WANG Xing, ZHAO Kaihong, et al. Study on the influence of *cyanobacterial* growth by UV-C photocatalytic oxidation with nano metric TiO_2 [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2007, 25(5): 457-46. (in Chinese))
- [35] 廖兴盛. UV-C 照射下纳米 TiO_2 光催化对蓝藻生长影响的研究及其应用 [D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- [36] 郭建伟,张永吉,曾果,等. H_2O_2 与 UV 工艺对铜绿微囊藻灭活特点比较 [J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1801-1806. (GUO Jianwei, ZHANG Yongji, ZENG Guo, et al. Comparison of H_2O_2 and UV processes on the inactivation efficiency *microcystis aeruginosa* [J]. Environmental Science, 2010, 31(8): 1801-1806. (in Chinese))
- [37] 景江,周明,汪星,等. H_2O_2 与 UV-C 灭藻的协同效果研究及工程实验 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(6): 59-63. (JING Jiang, ZHOU Ming, WANG Xing, et al. Engineering experiment and investigation of effect on degradation of *cyanobacteria* by the combination of UV-C and H_2O_2 [J]. Research of Environmental Science, 2006, 19(6): 59-63. (in Chinese))
- [38] 任晶. UV/ H_2O_2 对铜绿微囊藻抑制特性及其对微囊藻毒素降解机理研究 [D]. 上海:复旦大学, 2011.
- [39] QIAO R P, LI N, QI X H, et al. Degradation of microcystin-RR by UV radiation in the presence of hydrogen peroxide [J]. Toxic, 2005, 45(6): 745-752.
- [40] HE X, PELAEA M, WESTRICK J A, et al. Efficient removal of *microcystin-LR* by UV-C/ H_2O_2 in synthetic and natural water samples [J]. Water Research 2012, 46(5): 1501-1510.
- [41] GE S, AGBAKPE M, WU Z, et al. Influences of surface coating, UV irradiation and magnetic field on the algae removal using magnetite nanoparticles [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 49(2): 1190-1196.
- [42] BARHOUMI L, DEWEZ, D. Toxicity of super paramagnetic iron oxide nanoparticles on *green alga chlorella vulgaris* [J]. BioMed Research Internatiol, 2013, 11:1-11.
- [43] NAGARIA P, ROBERT C. DNA double-strand break response in stem cells: mechanisms to maintain genomic integrity [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA): General Subjects, 2013, 1830(2): 2345-2353.
- [44] 唐学玺,黄键. UV-B 辐射和蒽对三角褐指藻 DNA 伤害的相互作用 [J]. 生态学报, 2002, 22(3): 375-378. (TANG Xuexi, HUANG Jian. Interaction of UV-B radiation and anthracene on DNA damage of *phaeodactylum tricornutum* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(3): 375-378. (in Chinese))
- [45] WANG Z, CHEN Y, XIE P, et al. Removal of *microcystis aeruginosa* by UV-activated persulfate: performance and characteristics [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 300: 245-253.
- [46] CHEN Y, XIE P, WANG Z, et al. UV/persulfate preoxidation to improve coagulation efficiency of *microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 322: 508-515.
- [47] HE Y Y, HADER D P. Reactive oxygen species and UV-B: effect on *cyanobacteria* [J]. Photochemistry & Photobiology Science, 2002, 1(10): 729-736.
- [48] ROZEMA J, BJORN L O, BORNMAN J F, et al. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems: an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2002, 66(1): 2-12.

(收稿日期:2016-10-23 编辑:彭桃英)

