

# 纳米 $\text{TiO}_2$ - 光催化灭活污水厂出水病毒的研究

顾霓涛<sup>1</sup>, 龚天翼<sup>2</sup>, 乔宇祥<sup>3</sup>, 吕文洲<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市城市排水有限公司, 浙江 宁波 315192; 3. 宁波市环境保护与科学研究设计院, 浙江 宁波 315200)

**摘要:** 选取宁波市两个污水处理厂消毒前后出水,以噬菌体 MS2 作为模式病毒,探讨纳米  $\text{TiO}_2$  - 光催化灭活水中病毒的可行性。试验分别考察了  $\text{TiO}_2$  浓度、紫外光作用时间对病毒的灭活效果,评价了太阳光代替紫外光对出水中 MS2 的灭活能力。结果表明, $\text{TiO}_2$  - 光催化灭活污水处理厂出水 MS2 的效果因污水处理厂水质而异。低浓度  $\text{TiO}_2$  的灭活效果不佳,当  $\text{TiO}_2$  浓度为 200 mg/L 时,紫外光照射 6 h, A 厂消毒后出水中 MS2 的灭活率为 4.76-lg;照射 10 h 后,MS2 的灭活率为 6.94-lg;若使用太阳光代替紫外光照射 6 h,则 A 厂消毒后出水中 MS2 灭活率可以达到 7.88-lg,优于紫外光的灭活效果,表明在纳米  $\text{TiO}_2$  - 光催化灭活污水厂出水病毒过程中以太阳光代替紫外光具有可行性。

**关键词:** 污水厂出水; 病毒灭活; 纳米  $\text{TiO}_2$ ; 噬菌体 MS2

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0096-05

## Inactivation of Virus in Wastewater Treatment Plant Effluent by Nano $\text{TiO}_2$ -photocatalysis

GU Ni-tao<sup>1</sup>, GONG Tian-yi<sup>2</sup>, QIAO Yu-xiang<sup>3</sup>, LYU Wen-zhou<sup>1</sup>

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Ningbo Municipal Sewerage Co. Ltd., Ningbo 315192, China; 3. Ningbo Scientific Research and Design Institute of Environmental Protection, Ningbo 315200, China)

**Abstract:** The effluent before and after disinfection process of two wastewater treatment plants (WWTPs) in Ningbo was collected, and the feasibility of inactivating viruses in the effluent by nano  $\text{TiO}_2$ -photocatalysis was evaluated by using MS2 as the model virus. Effects of  $\text{TiO}_2$  concentration and irradiation time on inactivation efficiency of MS2 were investigated, and the capacity of inactivating MS2 in the effluent using sunlight instead of ultraviolet was discussed. The results showed that the inactivation efficiency of MS2 in the effluent varied from the effluent quality of WWTPs by  $\text{TiO}_2$ -photocatalysis. The inactivation efficiency was poor at low  $\text{TiO}_2$  concentration. 4.76-lg of MS2 in the effluent of the plant A was inactivated in 6 hours' ultraviolet irradiation at the concentration of 200 mg/L of  $\text{TiO}_2$ , and the inactivation rate reached 6.94-lg when the irradiation time increased to 10 hours. 7.88-lg of MS2 in the effluent after disinfection process of plant A was inactivated in 6 hours' sunlight irradiation instead of ultraviolet, and the inactivation efficiency was superior than that of ultraviolet, which indicated that it was feasible to

use sunlight instead of ultraviolet to inactivate viruses in the effluent of WWTPs by nano TiO<sub>2</sub>-photocatalysis.

**Key words:** effluent of WWTP; virus inactivation; nano TiO<sub>2</sub>; bacteriophage MS2

目前,城市污水处理厂工艺能有效去除颗粒物、降解有机物,并能使病原微生物大量减少,但出水中仍可能含有一定浓度的病毒粒子,若后续处理不当会对接触人群造成健康风险<sup>[1]</sup>。当前污水厂多采用紫外线、液氯、ClO<sub>2</sub> 或臭氧消毒工艺,可有效灭活部分病毒,如李梅等<sup>[2]</sup>测定北京 3 个采用 Cl<sub>2</sub> 消毒的污水处理厂对 SC 和 F-RNA 噬菌体的平均去除率分别为 72.45% ~ 99.89% 和 57.84% ~ 93.06%;仇付国等<sup>[3]</sup>证明臭氧对二级处理出水中 CoxB3 病毒的灭活率可达 1.33-lg ~ 3.83-lg。但是现有消毒工艺在应用中仍存在一些缺陷,比如紫外消毒效果受光线透过率和悬浮物浓度的影响,运行和维护成本较高;液氯和 ClO<sub>2</sub> 消毒会产生消毒副产物<sup>[4]</sup>;臭氧消毒受水质影响较大,且臭氧制备成本较高,副产物毒性未知<sup>[5]</sup>;此外,化学氧化剂类消毒工艺容易造成管道的腐蚀及老化,因此探索新型消毒方法十分必要。TiO<sub>2</sub> 作为一种环境友好型的光催化材料被广泛用于降解有毒有害物质<sup>[6,7]</sup>,近年来也被用于灭活水中的病原微生物<sup>[8~10]</sup>。Lee 等<sup>[11]</sup>利用 UVA 作为光源,在 TiO<sub>2</sub> 催化下,地表水中 MS2 去除率可达 4-lg。笔者探究了紫外光 - TiO<sub>2</sub> 系统灭活污水厂出水中 MS2 的效果,并考察了太阳光 - TiO<sub>2</sub> 系统应用于污水厂出水深度处理的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

噬菌体 MS2: 试验所用噬菌体 MS2 及宿主大肠杆菌来自于中国人民大学郑祥老师课题组。

MS2 培养过程和纳米 TiO<sub>2</sub> 悬液的制备方法详见文献<sup>[12]</sup>。

水样: 试验水样取自宁波市 A、B 两个污水厂。其中, A 厂主要处理生活污水, 采用紫外消毒工艺。B 厂主要处理生活污水和工业废水, 采用 ClO<sub>2</sub> 接触消毒工艺。分别取两个污水处理厂消毒前和消毒后的出水进行试验。

### 1.2 试验装置及仪器

采用模拟病毒 MS2 灭活装置, 主体为一台标准型圆周摇床, 以 150 r/min 的转速进行圆周摇动, 周转直径为 20 mm。摇床正上方为定波长黑光灯, 稳

定提供中心波长为 365 nm 的紫外光, 其中黑光灯管与圆周摇床摇动轴心的直线距离约为 15 cm, 试验过程中紫外光强度为  $(1\ 280 \pm 0.8) \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。将样品悬液装入聚乙烯无菌样品袋中, 试验证明其对紫外光具有良好的透过性<sup>[12]</sup>。样品袋从封口处卷起, 密封后固定于摇床上。

## 1.3 试验设计

### 1.3.1 检测水样中其他噬菌体

由于水样中可能存在能够感染试验所用宿主大肠杆菌的其他噬菌体, 为了避免其对后续 MS2 检测结果造成影响, 采用 0.45  $\mu\text{m}$  无菌滤膜过滤水样, 以去除悬浮物和细菌, 然后取一定量过滤水样进行病毒检测, 并将剩余水样密封保存于 4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱中。

### 1.3.2 紫外光 - TiO<sub>2</sub> 对 MS2 的灭活效果

将水样从冰箱取出, 放置至室温。测定预先准备的 MS2 悬液浓度, 用无菌超纯水稀释, 使 MS2 浓度约为  $10^9$  PFU/mL。取 4 个无菌样品袋, 分别装入 A 厂消毒前出水 (D1)、A 厂消毒后出水 (D2)、B 厂消毒前出水 (D3)、B 厂消毒后出水 (D4) 各 96.5 mL, 再分别加入 1 mL 稀释后的 MS2 悬液及 2.5 mL 经超声处理后的 TiO<sub>2</sub> 悬液, 使样品中 TiO<sub>2</sub> 浓度为 50 mg/L。另取 1 个样品袋, 装入 99 mL 无菌超纯水 (D5), 1 mL 稀释后的 MS2 悬液, 并且用铝箔包裹 (控制无光照条件) 作为对照。该对照试验用于分析 MS2 悬液在无光照、室温条件下, 摇床摇动 6 h 后存在的 MS2 浓度损失。将样品袋固定于振荡器上, 开启紫外光照射 6 h, 考察不同水样中 MS2 的灭活效果。MS2 灭活率按式 (1) 计算。

$$\text{灭活率} = \lg(C_0/C_k) \quad (1)$$

式中,  $C_0$  为对照组的 MS2 浓度;  $C_k$  为样品组的 MS2 浓度。

除了优化紫外光照时间试验外, 紫外光照射时间一律采用 6 h。另外, 对过滤处理的 A、B 厂消毒前出水、消毒后出水分别测定 TOC 含量。

### 1.3.3 TiO<sub>2</sub> 浓度对灭活 MS2 的影响

采用与 1.3.2 节类似的方法, 使样品中 TiO<sub>2</sub> 的最终浓度分别为 50、100、200 mg/L, 考察 TiO<sub>2</sub> 浓度对各污水处理厂水样中 MS2 灭活率的影响。

### 1.3.4 紫外光照射时间对 MS2 的灭活效果

取 A 厂消毒后出水,并使样品中  $\text{TiO}_2$  的浓度为 200 mg/L,考察紫外光照射时间分别为 6、8、10、12 h 时  $\text{TiO}_2$  对 MS2 的灭活率。

### 1.3.5 太阳光 - $\text{TiO}_2$ 对 MS2 的灭活效果

取 A 厂消毒后出水,使  $\text{TiO}_2$  浓度为 200 mg/L,选取晴朗的天气进行试验,太阳光照射时间段为 10:00—16:00,并不定时测定未包裹铝箔的样品温度。无菌超纯水 + 铝箔包裹(S1),主要评价温度的影响;无菌超纯水 +  $\text{TiO}_2$  + 铝箔包裹(S2),主要评价  $\text{TiO}_2$  颗粒吸附作用的影响;A 厂消毒后出水 +  $\text{TiO}_2$  + 铝箔包裹(S3),评价水样基质的影响;无菌超纯水 +  $\text{TiO}_2$ (S4)和 A 厂消毒后出水 +  $\text{TiO}_2$ (S5),分别评价太阳光 -  $\text{TiO}_2$  对纯水和水厂出水中 MS2 的灭活作用。

## 1.4 分析及数据处理

MS2 浓度:采用双层平板法<sup>[12]</sup>检测。由于  $\text{TiO}_2$  颗粒可能会吸附部分 MS2,所以检测时不过滤样品,而是直接取样品悬液进行稀释和测定。将双层平板放入 37 °C 的生化培养箱中培养过夜,避免培养基中的  $\text{TiO}_2$  颗粒再次被光激活发生光催化而影响测定结果。每个试验分别进行 3 次平行测定,结果以平均值表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水样中的其他噬菌体

检测结果表明,在 A、B 厂消毒前出水、消毒后出水水样中均未出现噬菌斑,说明水样中不存在能感染宿主大肠杆菌的噬菌体。

### 2.2 紫外光 - $\text{TiO}_2$ 对 MS2 的灭活效果

试验结果表明,紫外光 -  $\text{TiO}_2$  对 D1、D2、D3、D4 的 MS2 灭活率分别为 1.19-lg、1.55-lg、1.53-lg 以及 1.11-lg。可见,紫外光 -  $\text{TiO}_2$  对 A 厂消毒后出水和 B 厂消毒前出水中的 MS2 灭活效果较好,且灭活率接近;相比较而言,对 A 厂消毒前和 B 厂消毒后水样中的 MS2 灭活效果稍差,大约低于前者 0.4-lg。但总体上,低浓度  $\text{TiO}_2$  (50 mg/L) 对 4 种水样的 MS2 灭活率都不高。D1、D2、D3 以及 D4 的 TOC 分别为  $(4.717 \pm 0.185)$ 、 $(4.161 \pm 0.496)$ 、 $(5.051 \pm 0.151)$  和  $(7.829 \pm 0.235)$  mg/L,可见对来自同一污水处理厂的污水,紫外光 -  $\text{TiO}_2$  对 TOC 较高水样的 MS2 灭活率较低。推测原因,可能是水中的 TOC 消耗了系统产生的活性氧,导致用于灭活 MS2 的有

效活性氧量降低,从而降低了 MS2 灭活率。前期研究发现,50 mg/L 的  $\text{TiO}_2$  能够灭活自来水中 7.95-lg 的 MS2<sup>[12]</sup>。对比本试验,同样浓度的  $\text{TiO}_2$  对污水处理厂出水中 MS2 的灭活效果明显降低,最多只有 1.55-lg,这一结果可能与污水厂出水中存在其他物质有关,即基体效应也可能是引起灭活率差异的原因。Kanakaraju 等<sup>[6]</sup>发现,基体中存在 10 ~ 100 mmol/L 的  $\text{NO}_3^-$  或  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  时 MS2 的灭活率降低。A 厂和 B 厂除了接纳的水体性质不同外,B 厂在  $\text{ClO}_2$  消毒过程中会将部分难溶的有机物氧化成溶解性有机物,同时生成消毒副产物等<sup>[4]</sup>,进一步造成了基体性质的差异。B 厂消毒后水样中的 MS2 灭活率较 B 厂消毒前低 0.42-lg,推测原因除了后者 TOC 较高以外,也可能是  $\text{ClO}_2$  消毒过程中产生的  $\text{ClO}_2^-$  和  $\text{ClO}_3^-$  吸附于  $\text{TiO}_2$  表面,与光生电子  $e_{CB}^-$  和空穴  $h_{VB}^+$  发生氧化还原反应,从而降低了  $\text{TiO}_2$  对 MS2 的灭活。

### 2.3 $\text{TiO}_2$ 浓度对灭活 MS2 的影响

图 1 为  $\text{TiO}_2$  浓度对灭活 MS2 的影响。

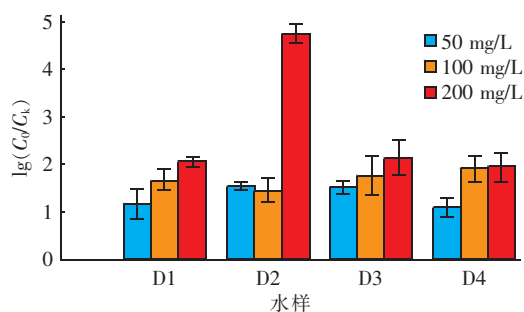


图 1  $\text{TiO}_2$  浓度对灭活 MS2 的影响

Fig. 1 Effect of  $\text{TiO}_2$  concentration on MS2 inactivation efficiency

从图 1 可以看出, $\text{TiO}_2$  浓度增加后,各水样中 MS2 的灭活率都有所提高,这与在蒸馏水和超纯水水中的试验结果相似<sup>[13]</sup>。当  $\text{TiO}_2$  浓度增加到 200 mg/L 时,A 厂消毒后出水中 MS2 的灭活率达到了 4.76-lg,明显较其他水样的灭活率高。从水样的 TOC 来看,A 厂消毒后出水的 TOC 最低,水样中其他有机质消耗活性氧的量最小;而且 A 厂采用紫外消毒,消毒过程中基本不产生消毒副产物,使  $\text{TiO}_2$  光催化生成的活性氧能有效地作用于 MS2,因此 A 厂消毒后出水的病毒灭活率随着  $\text{TiO}_2$  浓度增加而显著提高。鉴于  $\text{TiO}_2$  光催化对 A 厂消毒后出水中 MS2 的灭活率最高,后续试验水样取自 A 厂消毒后



出水,  $\text{TiO}_2$  最终浓度控制为 200 mg/L。

#### 2.4 紫外光照射时间对灭活 MS2 的影响

图 2 为紫外光照射时间对灭活 A 厂消毒后出水中 MS2 的影响。

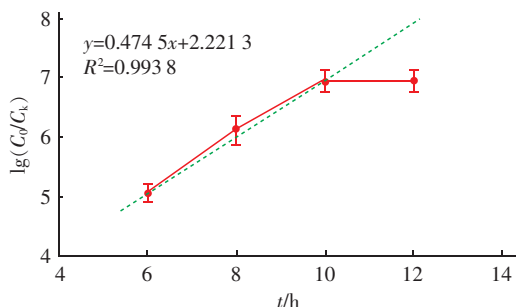


图 2 紫外光照射时间对灭活 MS2 的影响

Fig. 2 Effect of irradiation time on MS2 inactivation efficiency

从图 2 可以看出,与紫外光照射 6 h 相比,照射 8、10 h 时,MS2 的灭活率依次增加,MS2 灭活率随时间的增加接近线性。照射 10 h 时,MS2 的灭活率达到 6.94-lg,10 h 后病毒灭活率基本稳定在 7-lg 左右,说明此时水样中的 MS2 基本被完全灭活。Koi-zumi 等发现,在黑光灯强度为  $22 \text{ W/m}^2$  时, $\text{TiO}_2$  对蒸馏水中 MS2 的灭活率与光照时间呈线性关系。课题组的前期研究也证明了自来水中 MS2 的灭活率随紫外光作用时间的延长而增加,并且初始 2 h 内灭活速率最高<sup>[12]</sup>。

#### 2.5 太阳光 - $\text{TiO}_2$ 对 MS2 的灭活效果

试验过程中不定时检测了未包裹铝箔水样的温度,发现 13:00 时水样的温度最高,为  $40.4^\circ\text{C}$ ,而包裹铝箔的样品温度低于不包铝箔的样品。噬菌体 MS2 的最适生长温度约为  $37^\circ\text{C}$ ,因此温度不会对 MS2 造成灭活。试验结果表明,太阳光 -  $\text{TiO}_2$  对 S1、S2、S3、S4、S5 的 MS2 灭活率分别为 0.06-lg、0.71-lg、0.13-lg、7.72-lg、7.88-lg。可见,A 厂消毒后出水和超纯水环境中的 MS2 灭活率都能够达到 7.5-lg 以上,病毒灭活效果相比紫外光作用时更好,可能原因是太阳光中的 UVB 参与了部分 MS2 的灭活。Lee 等<sup>[11]</sup>指出,UVB 单独作用能灭活 4-lg 的 MS2,加入  $\text{TiO}_2$  后灭活率更高。Misstear 等<sup>[14]</sup>也表明,紫外光作用下 MS2 灭活速率在后期有一个减缓的过程,而太阳光作用下 MS2 灭活速率保持不变,因此太阳光 -  $\text{TiO}_2$  系统灭活病毒更加高效。相比之下,包裹铝箔样品(S1、S2、S3)的 MS2 灭活率都低于 1-lg,说明光和  $\text{TiO}_2$  联合作用是灭活 MS2 的主要

原因。

太阳光作为一种清洁能源,包含 UVB (280 ~ 320 nm)、UVA (320 ~ 400 nm) 和可见光 (400 ~ 700 nm)。根据  $\text{TiO}_2$  的光催化原理, $\text{TiO}_2$  能被太阳光激发产生光催化活性,本试验也证明了太阳光 -  $\text{TiO}_2$  系统能有效灭活污水厂消毒后出水中的 MS2,这将大幅度降低该技术的运行维护成本。以宁波市某规模为  $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的污水处理厂为例,现有紫外消毒工艺中紫外灯使用寿命一般是 8 000 ~ 10 000 h,灯管基本需要一年半一换,年备件更换以及运维费用在 50 万元以上。就运营成本而言,处理  $1 \text{ m}^3$  水的用电量为  $0.015 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,日运行成本为 1 647.8 元(不包含备件)。因此太阳光 -  $\text{TiO}_2$  消毒系统具有经济可行性。就本试验而言,悬浮态的纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒在病毒灭活后仍存在于水体中,可能对生态环境造成一定风险<sup>[15]</sup>,但随着固定化  $\text{TiO}_2$  技术的发展,如  $\text{TiO}_2$  纳米管等,未来使用  $\text{TiO}_2$  - 光催化技术对污水厂出水进行病毒灭活具有可行性。

#### 3 结论

①  $\text{TiO}_2$  - 光催化灭活污水厂出水中 MS2 的效果因水质而异, $\text{TiO}_2$  浓度较低 (50 mg/L) 时,系统对各污水厂出水中 MS2 的灭活效果均较差,灭活率仅为 1-lg ~ 2-lg; $\text{TiO}_2$  浓度增加至 200 mg/L 时,MS2 的灭活率也随之增大,并且对 A 厂消毒后出水中 MS2 的灭活效果最好,可达 4.76-lg。

② 对于 A 厂消毒后出水,MS2 的灭活率随紫外光照射时间的增加而上升,在 10 h 时可以达到 6.94-lg,其后稳定在 7-lg 左右。

③ 太阳光 -  $\text{TiO}_2$  对 A 厂消毒后出水中 MS2 的灭活率可以达到 7.88-lg,比紫外光照射效果更好。

#### 参考文献:

- [1] 景明,王磊. 污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应[J]. 环境科学,2016,37(2):622-629.  
Jing Ming, Wang Lei. Analysis of pathogenic bacteria in reclaimed water and impact of UV disinfection on the removal of pathogenic bacteria[J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 622-629 (in Chinese).
- [2] 李梅,胡洪营,张薛,等. 城市污水处理工艺对噬菌体的去除效果[J]. 环境科学,2006,27(1):80-84.  
Li Mei, Hu Hongying, Zhang Xue, et al. Removal of coliphages by wastewater treatment processes[J]. Environ-

- mental Science, 2006, 27(1): 80–84 (in Chinese).
- [3] 仇付国, 王晓昌. 污水再生工艺去除病原体效果的评价[J]. 中国给水排水, 2005, 21(7): 52–54.  
Qiu Fuguo, Wang Xiaochang. Assessment on wastewater reclamation and reuse process for pathogen removal[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(7): 52–54 (in Chinese).
- [4] 梁光, 文李敏.  $\text{ClO}_2$  和  $\text{Cl}_2$  对城市污水再生水消毒效果的比较[J]. 中国给水排水, 2009, 25(5): 103–105.  
Liang Guang, Wen Limin. Disinfection of reclaimed water of urban sewage with  $\text{ClO}_2$  and  $\text{Cl}_2$  [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(5): 103–105 (in Chinese).
- [5] 王祥勇, 陈洪斌, 阮久丽. 污水和再生水臭氧消毒的研究和应用[J]. 水处理技术, 2010, 36(4): 19–23.  
Wang Xiangyong, Chen Hongbin, Ruan Jiuli. Progress on wastewater and reused water disinfection by ozone[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(4): 19–23 (in Chinese).
- [6] Kanakaraju D, Glass B D, Oelgemöller M. Titanium dioxide photocatalysis for pharmaceutical wastewater treatment[J]. Environ Chem Lett, 2014, 12(1): 27–47.
- [7] 王阿楠, 滕应, 骆永明. 二氧化钛(P25)光催化降解二苯砷酸的研究[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3800–3806.  
Wang A'nan, Teng Ying, Luo Yongming. Photo-catalytic degradation of diphenylarsinic acid by  $\text{TiO}_2$  (P25) [J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3800–3806 (in Chinese).
- [8] García-Fernández I, Fernández-Calderero I, Polo-López M I, et al. Disinfection of urban effluents using solar  $\text{TiO}_2$  photocatalysis: A study of significance of dissolved oxygen, temperature, type of microorganism and water matrix[J]. Catal Today, 2015, 240: 30–38.
- [9] Zheng X, Chen D, Wang Z W, et al. Nano- $\text{TiO}_2$  membrane adsorption reactor (MAR) for virus removal in drinking water[J]. Chem Eng J, 2013, 230: 180–187.
- [10] Zheng X, Wang Q, Chen L Y, et al. Photocatalytic membrane reactor (PMR) for virus removal in water: Performance and mechanisms[J]. Chem Eng J, 2015, 277: 124–129.
- [11] Lee J E, Ko G. Norovirus and MS2 inactivation kinetics of UV-A and UV-B with and without  $\text{TiO}_2$  [J]. Water Res, 2013, 47(15): 5607–5613.
- [12] 吕文洲, 乔宇祥, 刘英. 纳米  $\text{TiO}_2$  – 光催化灭活水中噬菌体 MS2[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2532–2538.  
Lü Wenzhou, Qiao Yuxiang, Liu Ying. Inactivation of bacteriophage MS2 in water by  $\text{TiO}_2$  nanoparticles coupled with light[J]. China Environmental Science, 2015, 35(8): 2532–2538 (in Chinese).
- [13] Cheng R, Xue X Y, Liu L, et al. Removal of waterborne pathogen by nanomaterial-membrane coupling system[J]. J Nanosci Nanotechnol, 2018, 18(2): 1027–1033.
- [14] Misstear D B, Gill L W. The inactivation of phages MS2, ΦX174 and PR772 using UV and solar photocatalysis[J]. J Photochem Photobiol B, 2012, 107: 1–8.
- [15] Weir A, Westerhoff P, Fabricius L, et al. Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products[J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(4): 2242–2250.



作者简介: 顾霓涛(1995–), 女, 浙江绍兴人, 本科, 主要研究方向为废水生物处理。

E-mail: gunitao@foxmail.com

收稿日期: 2017–09–20