

再生水补给的模拟景观水体中藻生物膜特性研究

王 怡, 张 恒, 韦存智, 王文怀

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 以西安市某再生水厂出水为水源, 通过模拟景观水体中藻生物膜的生长, 探索水体固相介质接触面藻生物膜的滋生、时空变化及组成特征。试验结果表明, 不同时间和不同位置藻生物膜中的藻数量、藻种分布及物质组成存在明显差异。单位面积藻生物膜中的碳氮磷含量、藻数量、EPS 含量及铁锰含量随时间逐渐增加, 在试验运行第 65 天时达到最大值, 然后随脱落降低; 试验过程中, 中层藻生物膜中的 TCOD、TN 和 TP 的平均含量、藻数量、EPS 含量均明显高于上层和下层的对应值, 藻生物膜的这种层间差异可能主要与光照有关。总之, 粘附于固相介质表面的藻生物膜, 可吸收利用再生水中的营养物、吸附富集再生水中的铁锰等金属离子, 一定程度上可缓解再生水补给的景观水体富营养化和重金属污染问题, 但需通过主动控制的方式以避免其引起水体景观效应降低的负面影响。

关键词: 再生水; 景观水体; 藻生物膜; 特征

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0150-05

Research on the characteristics of algal biofilms in a simulated landscape water supplied with reclaimed water

WANG Yi, ZHANG Heng, WEI Cunzhi, WANG Wenhui

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: This study explored the growth, temporal and spatial variation and composition characteristics of algae biofilm on the surface of solid medium formed in a simulated landscape water supplied with reclaimed water. Results showed that an obvious difference existed in the algae number, algae species distribution and the composition in the algae biofilm at different time and location. The number of algae, EPS content, carbon, nitrogen, phosphorus content, iron and manganese content in the algae biofilm of per unit area increased gradually with time to the maximum value on the 65th day, and then decreased due to sloughing. In addition, during the experiment, the average content of TCOD, TN and TP, algae number and EPS in the algae biofilm of the middle layer was significantly higher than that in the upper layer and lower layer, which may be attributed to illumination factor. In brief, the algae biofilm formed in the landscape water can absorb and enrich the nutrients and some heavy metals from the reclaimed water, which may alleviate the eutrophication and heavy metal pollution when the landscape water was supplied with the reclaimed water to a certain extent. However, some proactive measures should be taken to control the negative effect to landscape of algae biofilm when the reclaimed water is adopted.

Key words: reclaimed water; landscape water; algae biofilm; characteristics

城市景观水体作为城市生态建设的重要组成部分, 可以起到调节局部小气候、减缓城市热岛效应的重要作用^[1], 但其补给水量和水质常受制于当地水资源状况。地表水和地下水的持续补给无疑加剧了缺水地区的水资源危机, 而城市污水处理厂制取的再生水回用于景观水体, 在一定程度上可以保障水环境补给的水量, 从而可有效缓解水资源危机。由于再生水中营养物浓度相对较高, 加上景观水体流动性差、自净能力弱等特点, 再生水补给的景观水体极易发生富营养化^[2], 使得水

体中藻密度大幅增加。藻类在景观水体中除了以悬浮状态存在之外, 还会在与水接触的任何固相界面附着形成藻类主导的生物膜, 即“藻生物膜”。藻生物膜同时具有藻类的特征和生物膜的特性, 能够利用氮、磷等营养物质并通过光合作用合成自身, 从而降低水中营养物浓度^[3-6], 同时也能够利用生物膜中的胞外聚合物吸收富集水中的重金属^[7-8], 从而对水质改善起到积极的作用。近年来, 国内外对于藻生物膜的研究主要集中在培养、固定等主动控制以用于污废水的深度处理和能源的回收利用,

收稿日期: 2019-03-20

修改稿日期: 2020-01-08

基金项目: 陕西省自然科学基金重点基金项目(2016JZ019)

第一作者: 王 怡(1971—), 女, 博士, 教授, 研究方向为污泥资源化的理论和技术。E-mail: wangyi1003@sina.com

如利用藻生物膜脱氮除磷^[9;10]及生产生物柴油^[11]. 然而, 对于水环境中特别是再生水补给的景观水体中非控制条件下形成的藻生物膜特征和时空变化的研究尚少, 因此, 本论文首次系统研究了再生水补给的模拟景观水体中藻生物膜的形成、时空分布和物质组成特征, 以期为实际景观水体中藻生物膜的控制和利用提供有价值的参考.

1 材料与方法

1.1 模拟试验的建立

试验位于西安某中水公司一空旷区域, 采用再生水作为唯一补水水源, 在一个表面敞开、四周遮光处理、有效容积 800 L、总高度 1 m 的聚氯乙烯水桶中模拟景观水体, 其水质指标如表 1 所示. 试验连续运行 85 d, 期间当水桶中有效水深低于一定高度时即进行补水并记录补水量及相应水质.

表 1 试验期间补给水源(再生水)水质

Tab. 1 Water quality parameters of the simulated landscape water during the experiment

水质指标 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均浓度	水质指标	平均浓度
TN	5.02 ± 1.66	pH	7.45 ± 0.52
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	1.22 ± 1.04	浊度(NTU)	2.00 ± 0.49
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	3.28 ± 1.33	COD(mg/L)	25.27 ± 1.91
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	0.10 ± 0.07	Chla($\mu\text{g/L}$)	1.46 ± 0.61
TP	0.52 ± 0.16	藻密度(个/ mL)	0
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.48 ± 0.15		

1.2 模拟景观水体水样的采集及测定

试验在 2017 年 8 月~2017 年 11 月运行, 水样采集频次为 1 次/5 d, 每次采样均在 am 11:00 进行. 用采水器在水面下 30 cm 处的 3 个不同位置采集水样, 将其混合后作为代表水样进行测定. 水温(T)和溶解氧(DO)采用 HACH 便携式多功能水质测定仪(HQ-30D)现场测定, N 、 P 、藻密度和叶绿素 a (Chl- a)等水质指标均带回教育部重点实验室测定, 其中浊度、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TP、SPR、叶绿素 a (Chl- a)均采用 XINMAO752N 分光光度计测定; TCOD 采用重铬酸钾法测定; 藻类采用 Nikon 90i 显微镜镜检并计数.

1.3 模拟景观水体中藻生物膜的采样及测定

以水面为起点(0 点), 在垂直方向按不同水深(0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm)将反应器壁划分为上部、中部和下部三个光照强度逐渐下降的不同区域, 每个区域再沿周长均匀划分为相同

面积的四等分. 在试验运行第 25 天、45 天、65 天和 85 天时分别采集不同区域相同附着面积上的藻生物膜, 记录采集区域面积并将其分别定容到 500 mL 容量瓶中带回实验室分析.

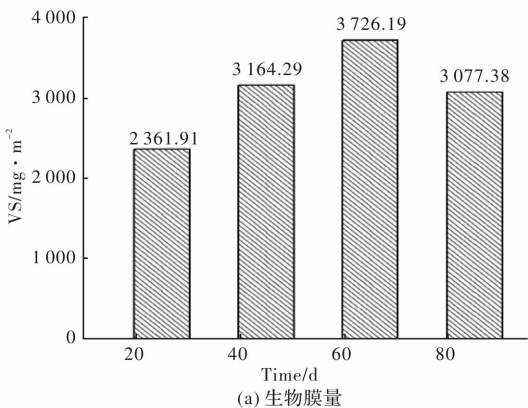
藻生物膜指标包括生物量(VS)、TN、TP、TCOD、Fe、Mn 含量以及藻的种类、数量和胞外聚合物(EPS)含量. 其中 VS 采用重量法测定; TN 采用过硫酸钾氧化, 紫外分光光度法测定; TP 采用钼锑抗分光光度法测定; TCOD 采用重铬酸钾法测定; EPS 含量采用阳离子树脂交换法提取, 其中多糖采用苯酚-硫酸法测定, 蛋白质采用 Lowry 法测定, DNA 采用二苯胺比色法测定; Fe、Mn 含量利用三酸消解, 原子吸收光谱法测定(SOLAAR 原子吸收光谱仪, ice 3000 series); 藻的种类及数量采用 Nikon 90i 显微镜镜检并计数.

2 结果

2.1 藻生物膜量及碳氮磷时空变化

图 1 为单位面积藻生物膜量历时变化及其碳氮磷含量时空分布. 由图 1(a)可知, 单位面积的藻生物膜量在前 65 d 呈稳定增长趋势, 65 d 时增至最大值 $3\,726.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 然后下降. 因此, 藻生物膜在前 65 d 的附着量大于脱落量, 此后脱落量增大而引起生物量的减少.

图 1(b)为不同位置单位面积藻生物膜中 TCOD、TN 和 TP 含量历时变化, 由图可知三者变化趋势和 VS 相同, 均随时间呈先增加到 65 d 时达最大值, 然后减小. 试验全程, 上层藻生物膜中 TCOD、TN 和 TP 的平均含量分别为 $3\,592.86 \pm 2\,015.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $45.43 \pm 4.93 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $11.12 \pm 0.81 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 中层为 $5\,164.29 \pm 3\,114.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $58.16 \pm 10.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $13.83 \pm 1.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 下层为 $4\,007.14 \pm 2\,560.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $49.58 \pm 11.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $9.96 \pm 3.45 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 因此, 中层藻生物膜中 TCOD、TN 和 TP 的平均含量均明显高于上层和



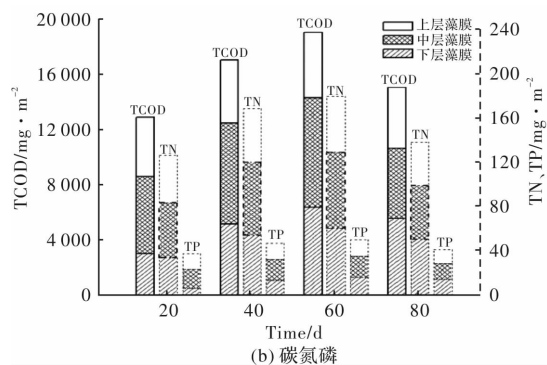


图 1 单位面积藻生物膜量历时变化及其碳氮磷含量时空变化

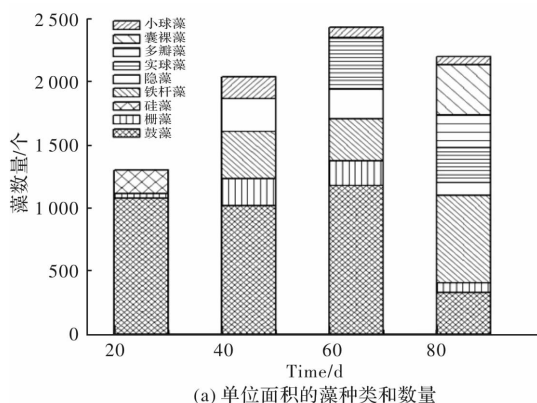
Fig. 1 Time course of algae biofilm biomass and spatio-temporal variations of carbon, nitrogen and phosphorus content in per unit area

下层,而上层和下层单位面积藻生物膜中三种物质的平均含量相差较小。

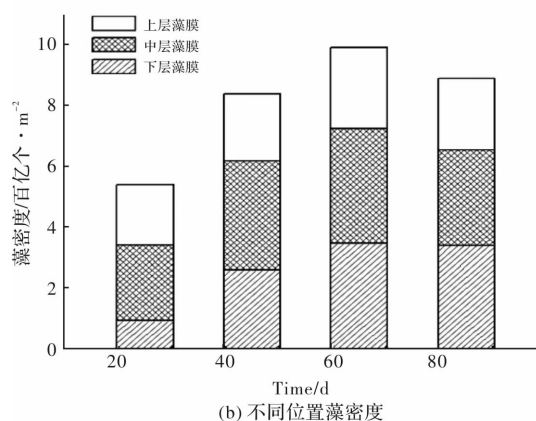
2.2 藻生物膜中藻种类、数量及不同位置藻密度历时变化

图 2(a)为单位面积藻生物膜中藻种类、数量历时分布及变化。由图可知,藻生物膜中藻数量的变化随时间呈先增加后减小的趋势,而藻种类随时间呈不断增加的趋势,从第 25 天时的 3 种增长到 85 d 时的 9 种。此外,不同时期藻生物膜中的优势藻种存在一定差异,前 65 d 的藻生物膜中优势藻种均为鼓藻,分别占相应藻生物膜中总藻的 79.16%、47.26%和 47.18%。85 d 时,铁杆藻出现并发展为主导藻种,占比 30.88%,鼓藻仅占 14.55%,且衍生出 17.76%囊裸藻和 11.47%多瓣藻。整个试验过程中,隐藻和栅藻数量相对稳定,其均值分别占总藻数的 $8.65 \pm 3.91\%$ 和 $6.01 \pm 3.36\%$ 。

图 2(b)为不同位置藻密度历时变化。由图可知,不同位置藻密度的变化趋势相同,均呈先增加后降低的趋势。上层和中层藻密度在试验运行前 25 d 快速增加,25~65 d 稳定上升并达到最大值 2.659 百亿个 $\cdot m^{-2}$ 和 3.782 百亿个 $\cdot m^{-2}$,随后逐渐降



(a) 单位面积的藻种类和数量



(b) 不同位置藻密度

图 2 藻生物膜中藻种类、数量及藻密度历时变化

Fig. 2 Time course of algae species, number and density in algae biofilm

低。而下层藻密度在前 25 d 增长较为缓慢,65 d 时达最大值,后期略有下降。上层、中层和下层藻密度平均值分别为 2.303 ± 0.283 百亿个 $\cdot m^{-2}$ 、 3.255 ± 0.572 百亿个 $\cdot m^{-2}$ 和 2.587 ± 1.187 百亿个 $\cdot m^{-2}$ 。因此,藻密度最大的区间在中层。

总之,藻生物膜中的总藻数量和藻密度随时间均呈先增加后减小的趋势,藻种类型随时间呈稳定增加的趋势且优势藻种不断变化,藻密度最大的区间在中层区域。

2.3 藻生物膜胞外聚合物时空变化

图 3 为单位面积藻生物膜 EPS 的历时变化及其不同组分的时空变化。由图 3(a)可知,单位面积藻生物膜 EPS 中多糖含量最大,蛋白质次之,DNA 最小。试验全程多糖、蛋白质和 DNA 的平均含量分别为 74.84 ± 21.35 $mg \cdot m^{-2}$ 、 32.11 ± 8.00 $mg \cdot m^{-2}$ 和 8.35 ± 1.81 $mg \cdot m^{-2}$,多糖分别为蛋白质和 DNA 平均含量的 2.33 倍和 8.96 倍。此外,EPS 中多糖和蛋白质含量在前 65 d 持续增加至最大值后下降,DNA 含量在 85 d 内基本保持稳定。

由图 3(b)可知,单位面积藻生物膜 EPS 中多糖、蛋白质和 DNA 含量在不同位置的变化趋势相同,其中上层和中层单位面积藻生物膜 EPS 中多糖、蛋白质和 DNA 含量随时间均呈先增加后降低的趋势,而下层则随时间呈稳定增长的趋势。试验期间,上、中、下三层藻生物膜 EPS 中多糖的平均含量分别为 67.43 ± 6.30 $mg \cdot m^{-2}$ 、 95.57 ± 14.72 $mg \cdot m^{-2}$ 和 61.53 ± 23.07 $mg \cdot m^{-2}$,蛋白质平均含量分别为 28.33 ± 2.95 $mg \cdot m^{-2}$ 、 40.27 ± 5.40 $mg \cdot m^{-2}$ 和 27.73 ± 7.96 $mg \cdot m^{-2}$,DNA 平均含量分别为 7.43 ± 0.77 $mg \cdot m^{-2}$ 、 10.17 ± 0.70 $mg \cdot m^{-2}$ 和 7.46 ± 2.08 $mg \cdot m^{-2}$ 。由此可

见, 在水面下 20~40 cm 处的中层位置, 单位面积藻生物膜 EPS 中多糖、蛋白质和 DNA 含量最高, 而上层和下层的对应值较小且较为接近, 约为中层藻生物膜 EPS 中多糖的 $67.47 \pm 3.09\%$ 、蛋白质的 $69.61 \pm 0.75\%$ 和 DNA 的 $73.21 \pm 0.15\%$ 。

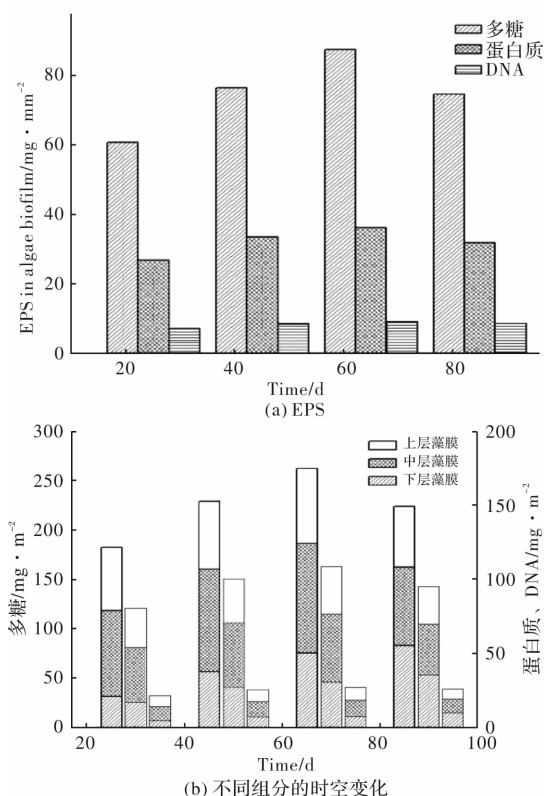


图 3 单位面积藻生物膜 EPS 的历时变化及其不同组分的时空变化

Fig. 3 Time course of EPS in algae biofilm in per unit area and the temporal and spatial variations of its components

2.4 藻生物膜中铁锰元素的时空变化

图 4 为不同位置单位面积藻生物膜中铁、锰含量历时变化。由图可知, 中层位置单位面积藻生物膜中铁、锰含量均明显高于上层和下层藻生物膜对应值, 在试验前 65 d 两者含量稳定上升, 第 65 天时分别达到最大值 $10.95 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4.77 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 而上层和下层藻生物膜中铁和锰含量相差较小。试验期间, 上、中、下三层藻膜中铁的平均含量分别为 $5.93 \pm 0.21 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $8.10 \pm 2.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $6.60 \pm 1.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 锰的平均含量分别为 $2.19 \pm 0.45 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $3.53 \pm 1.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.12 \pm 0.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 均表现为中层最大, 下层次之, 上层最小。相比于锰, 对应位置藻生物膜中铁含量明显较高。藻生物膜作为藻类的一种特殊存在形式, 通过分泌 EPS 粘附或吸附再生水中低浓度的金属离子如 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 等。张道勇^[7]对藻菌生物膜的相关性研究结果表明, 丝

藻所分泌的多聚糖对重金属有明显的吸附作用, 藻生物膜中的重金属含量随着多聚糖含量的增加而增加, 这与本研究的结果一致。但是, 反应器壁上藻生物膜中富集了致色的铁锰离子, 使得藻生物膜颜色变深发黑, 成为水体的背景色, 进而降低水体景观效应。因此, 应在藻生物膜生长旺盛期后\脱落期前进行主动控制, 进而避免其引起污染物重新释放和降低水体景观效应的负面影响。

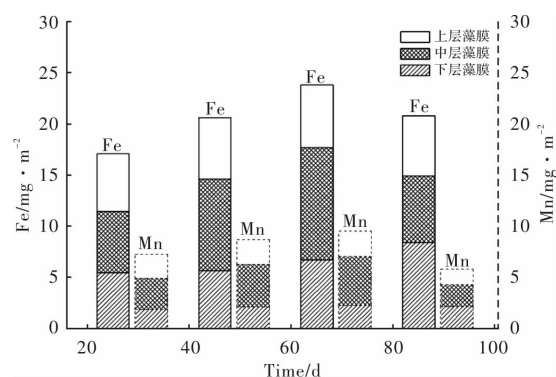


图 4 不同位置单位面积藻生物膜中铁锰历时变化
Fig. 4 Time course of iron and manganese in algae biofilm of per unit area at different locations

3 讨论

研究表明, 光照是影响藻类生长的关键因素之一^[10,12,15]。在光照强度较低时, 光为限制性生长条件, 藻类生物量和光照强度成正相关; 而当光照强度较高且超过藻生物膜生长的光饱和点时, 光照对藻生长产生一定光抑制现象, 导致生物膜生长较慢^[14]。同时, 水深也在一定程度上影响光照的强度, 光强在深水中的衰减比例大于浅水^[15]。本试验中, 反应器壁中层的藻生物膜, 相较于上层发生光抑制的可能性更低, 而相较于下层, 也不容易引发光限制现象, 为藻生物膜生长最适位置, 因此其藻生物量相对最大。

光照除了在空间上有区别之外, 在时间上也存在不同。本试验在夏秋季进行, 试验前期, 日照时数和光照强度为一年中最强, 藻生物膜生长迅速; 试验后期, 随着日照时数和光照强度不断下降, 不同位置单位面积藻生物膜量、TCOD、TN、TP 含量均较之前出现不同程度的下降。并且, 随着试验运行, 模拟景观水体桶壁上附着藻生物膜中的藻种也随光照的变化发生演替, 由在强光条件优势生长的绿藻门鼓藻, 逐渐转变为适应较弱光强的硅藻门中的铁杆藻。这与 Singh S P^[16]等人的研究结果相同。

4 结论

(1) 再生水为补给水源的模拟景观水体中形成

的藻生物膜,在不同时间和不同位置的藻数量及藻种分布、物质组成存在明显差异。单位面积的藻生物膜中碳氮磷含量、藻数量、EPS含量以及铁(Fe)锰(Mn)含量均随时间逐渐增加,均在试验运行65 d时达到最大值,然后随脱落降低;试验过程中,中层光照强度优于上层和下层,其藻生物膜中TCOD、TN和TP的平均含量、藻数量、EPS含量明显高于上层和下层的对应值。藻生物膜的这种层间差异可能主要与光照有关。

(2)粘附于固相界面的藻生物膜,可吸收再生水中的营养物质,吸附富集铁锰等金属离子,因此一定程度上可缓解再生水补给的景观水体富营养化和重金属污染问题,但其引起水体景观效应降低的负面影响也需重视并通过主动控制方式避免。

参考文献 References

- [1] 倪永炯,李军,韦甦, et al. 城市小型景观水体水质控制生态工程案例[J]. 中国给水排水, 2017(12):50-54.
NI Yong jiong, LI Jun, WEI Su, et al. Cases of ecological project for water quality protection in small urban landscape water bodies[J]. China Water&Wastewater, 2017(12):50-54.
- [2] 王怡,郭晓瑜,赵超. 营养物质和藻类在再生水制取及景观水体补给中的变化[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018,50(1):105-110.
WANG Yi, GUO Xiao yu, ZHAO Chao. Changes of nutrient and algae in the production of reclaimed water and the supply of landscapewater[J]. Xi'an Univ. of Archi. & Tech. (Natural Science Edition), 2018,50(1):105-110.
- [3] BOELEEE N C, TEMMINK H, JANSSEN M, et al. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms[J]. Water Research, 2011, 45(18):0-5933.
- [4] 邢丽贞,张向阳,张波, et al. 藻菌固定化去除污水中氮磷营养物质的初步研究[J]. 环境科学与技术, 2006(1):33-34.
XING Li zhen, ZHANG Xiang yang, ZHANG Bo, et al. A preliminary study on eliminating nitrogen and phosphorus from artificial wastewater by immobilized bacteria-algae[J]. Environmental Science and Technology, 2006(1):33-34.
- [5] SU Y, MENNERICH A, URBAN B. The long-term effects of wall attached microalgal biofilm on algae-based wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2016,218:1249-1252.
- [6] SUTHERLAND D L, CRAGGS R J. Utilising periphytic algae as nutrient removal systems for the treatment of diffuse nutrient pollution in waterways[J]. Algal Research, 2017, 25:496-506.
- [7] 张道勇,赵勇胜,潘响亮. 胞外聚合物(EPS)在藻菌生物膜去除污水中Cd的作用[J]. 环境科学研究, 2004, 17(5):52-55.
ZHANG Dao yong, ZHAO Yong sheng, PAN Xiang liang. The role of EPS in removing cadmium in sewage by algae-bacteria biofilm[J]. Research of Environmental Sciences, 2004,17(5):52-55.
- [8] HILL W R, LARSEN I L. Growth dilution of metals in microalgal biofilms[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(6):1513-1518.
- [9] 马沛明,况琪军,凌晓欢, et al. 藻类生物膜技术脱氮除磷效果研究[J]. 环境科学, 2007, 28(4):742-746.
MA Peiming, KUANG Qi jun, LING Xiao huan, et al. Study on efficiency of nitrogen and phosphorus removal by algal biofilm [J]. Environmental Science, 2007, 28(4):742-746.
- [10] KATERINA S, MARTIN T, TOMAS R. Phosphorus removal using a microalgal biofilm in a new biofilm photobioreactor for tertiary wastewater treatment[J]. Water Research, 2015, 71:55-63.
- [11] ZHANG Q, YU Z, ZHU L, et al. Vertical-algal-biofilm enhanced raceway pond for cost-effective wastewater treatment and value-added products production[J]. Water Research, 2018, 139:144-157.
- [12] 朱林,车轩,曾宪磊, et al. 光强对菌藻共生生物膜群落结构的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(10):94-98.
ZHU Lin, CHE Xuan, ZENG Xian lei, et al. Effects of light intensity on the community structure of symbiotic biofilm of bacillus and algae[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(10):94-98.
- [13] GAO F, YANG Z H, LI C, et al. A novel algal biofilm membrane photobioreactor for attached microalgae growth and nutrients removal from secondary effluent[J]. Bioresource Technology, 2015, 179:8-12.
- [14] CHIA S R, ONG H C, CHEW K W, et al. Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production [J]. Renewable Energy, 2017:S0960148117302938.
- [15] 李春,王胜威,张磊, et al. 膜生物反应器中小球藻生物膜生长与代谢的光调控特性[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2):670-676.
LI Chun, WANG Sheng wei, ZHANG Lei, et al. Regulation of light intensity on characteristics of growth and metabolism of Chlorella biofilm in a membrane bioreactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(2):670-676.
- [16] SINGH S P, SINGH P. Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 50:431-444.

(编辑 沈 波)