

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.01.14

3种微藻在龟鳖养殖废水中的生长与脱氮除磷特性

赵秀侠, 杨坤, 方婷, 李静, 卢文轩

(安徽省农业科学院水产研究所, 安徽合肥 230036)

摘要:选取小球藻(*Chlorella* sp.)、栅藻(*Scenedesmus* sp.)和螺旋藻(*Spirulina* sp.)为试验藻种,分别接种于经沉淀池初步处理后排放的龟鳖养殖废水(取自无为县某养殖场,简称WW废水)和无任何处理直接排放的龟鳖养殖废水(取自大杨镇某养殖场,简称DY废水),考察3种微藻生长特性和对废水中氮磷的去除效果,比较其对龟鳖养殖废水的净化能力。结果表明:所选的3种微藻在两种废水中生长特性不同,DY废水中3种微藻细胞密度与生物量均大于其在WW废水中的相应指标,DY废水中小球藻、栅藻和螺旋藻的最大生物量分别为0.26 g/L、0.28 g/L和0.20 g/L。不同微藻对废水中氮磷去除效果各不相同,栅藻去除TN效果最好,最大去除率为93.65%,小球藻去除TP效果最好,最大去除率为99.46%,螺旋藻去除NH₄⁺-N效果最好,最大去除率为98.79%。

关键词:微藻;龟鳖养殖废水;生长特性;脱磷除氮

中图分类号:S937.3

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)01-0083-05

Growth feature and nitrogen and phosphorus removal characteristics of three microalgae in turtle breeding wastewater

ZHAO Xiuxia, YANG Kun, FANG Ting, LI Jing, LU Wenxuan

(Fisheries Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230036, China)

Abstract: *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. and *Spirulina* sp. were inoculated to two kinds of turtle breeding wastewater. One kind of wastewater discharged after preliminary treatment by a sedimentation tank (taken from a breeding plant in Wuwei County, abbreviated as WW wastewater), and the other kind of wastewater discharged without any treatment (taken from a breeding plant in Dayangzhen, abbreviated as DY wastewater). The growth feature and nitrogen and phosphorus removal characteristics of three microalgae were studied and the purification ability of three microalgae was compared. Results show that three microalgae has different growth feature in two kinds of wastewater. The cell density and biomass accumulation of three microalgae are higher in DY wastewater than in WW wastewater. The highest biomass accumulations of three microalgae in DY wastewater are 0.26 g/L, 0.28 g/L, and 0.20 g/L respectively. The effects of different microalgae on the removal of nitrogen and phosphorus from wastewater are different. TN can be easily removed by *Scenedesmus* sp. with the highest removal rate of 93.65%, TP can be easily removed by *Chlorella* sp. with the highest removal rate of 99.46%, and NH₄⁺-N can be easily removed by *Spirulina* sp. with the highest removal rate of 98.79%.

Key words: microalgae; turtle breeding wastewater; growth feature; nitrogen and phosphorus removal

基金项目:安徽省农业科学院人才发展专项(17F0506)

作者简介:赵秀侠(1981—),女,助理研究员,博士,主要从事渔业水环境保护与利用研究。E-mail:xiuxia99@126.com。

通信作者:卢文轩,副研究员。E-mail:ahfishery@163.com。

我国是水产养殖大国,龟鳖养殖为新兴特种养殖产业,养殖废水管理方式多采用直接排放方式,废水处理与利用效率低下,对周边水域环境和生态系统平衡造成严重危害。与龟鳖养殖规模逐渐加大相反,对于龟鳖养殖废水生态净化处理和资源化利用研究较少。目前,在水产养殖废水资源化循环利用方面,国内学者较多采用以生物膜法、人工湿地、固定化菌藻、微生物制剂等为主体的污水处理工艺^[1-4],这些方法均能有效去除悬浮物和有机物,但也存在投资规模大、运行成本高、系统集成水平低等问题^[5]。微藻是一类光能自养型单细胞生物,具有资源量丰富、光合效率高、生长速率快、环境适应性强等特点。藻类生长能直接吸收废水中有机营养物质和无机物,促进磷沉降和氨态氮降低,提高水体 pH 值^[6]。利用微藻处理水产养殖废水,一方面可以净化污水,对水体有抑菌消毒作用,另一方面减轻养殖环境压力,可以获得有营养价值的藻类产物,为经济类水产品种提供饵料,促进养殖业可持续发展。

本研究选取小球藻 (*Chlorella* sp.)、栅藻 (*Scenedesmus* sp.)、螺旋藻 (*Spirulina* sp.) 3 种常用微藻,比较其在经沉淀池初步处理后排放的龟鳖养殖废水和无任何处理直接排放的龟鳖养殖废水中的生长特性及对氮磷去除效果,探讨在不同养殖废水中微藻的生长特性,筛选适合龟鳖养殖废水净化与规模化培养的藻种,以期微藻净化龟鳖养殖废水及废水规模化生物处理提供理论基础。

1 试验材料与研究方法

1.1 试验材料

取自安徽省芜湖市无为县某龟鳖养殖场经沉淀池初步处理后的废水(简称 WW 废水);取自安徽省合肥市郊区大杨镇某龟鳖养殖场无任何处理措施直接排放的废水(简称 DY 废水)。两种废水均经过 0.45 μm 滤膜过滤去除细菌、藻类和其他悬浮固体物质后使用,过滤后废水由于营养盐浓度较高,用于微藻培养试验时,稀释 8 倍后使用。两种废水主要水质指标见表 1。

试验用小球藻、栅藻和螺旋藻由中国科学院武汉水生生物研究所提供。藻液经 BG-11 培养基扩

大培养后用于试验。

1.2 研究方法

试验分为两组,WW 废水与 DY 废水各一组,试验于 200 mL 锥形瓶中进行,每瓶加入 150 mL 过滤后废水为培养基。在每个组别中均接种小球藻、栅藻和螺旋藻 3 种藻液,每种藻液设置 3 个平行,每组共 9 个锥形瓶。每个锥形瓶取 1.0 mL 试验藻种接种,接种藻液初始密度为 1.0×10^5 个/mL,放入人工气候箱进行培养。培养温度为 25℃,光照强度为 2000 lx,相对湿度为 75%,光暗比为 12 h:12 h,每天摇瓶 3 次,培养至藻类处于对数增长期。

初始接种藻液的藻细胞计数方法采用 0.1 mL 藻类计数框计数藻细胞数目,运用视野计数法换算成藻液中藻细胞密度。

采用干重法测定藻细胞生物量,用来反映藻类细胞生长状况。首先将 0.45 μm 醋酸纤维滤膜预先烘干至恒重,其次取 2.5 mL 藻液进行真空抽滤,将带有藻体的滤膜放置到烘箱中,于 105℃ 条件下烘干 24 h 至恒重。微藻生物量干重 D_w 的计算公式^[7]为

$$D_w = 400(M_1 - M_0) \quad (1)$$

式中: M_0 为预先烘干至恒重的滤膜质量; M_1 为烘干 24 h 后载有藻体的滤膜质量。

微藻培养结束后,取适量藻液经 0.45 μm 滤膜过滤,测定滤液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD 质量浓度和 pH 值。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测定采用纳氏试剂光度法;COD 测定采用重铬酸钾法;TN 与 TP 的质量浓度测定采用过硫酸盐氧化法;pH 值用雷磁 PHB-4 便携式 pH 计测定^[8]。

利用藻类细胞密度反映藻类生长特性。由于小球藻、栅藻和螺旋藻分别与其在 680 nm、650 nm、560 nm 处光密度值呈线性相关($P < 0.01$)^[9],利用可见分光光度计(B722s,上海棱光技术有限公司)定期测定 3 种藻液在对应波长处光密度值代表细胞密度。

采用 SPSS13.0 和 Origin8.5 对数据进行统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 3 种微藻在龟鳖养殖废水中生长特性

在 DY 废水中,小球藻、栅藻和螺旋藻 3 种微藻

表 1 试验废水主要水质指标

废水类型	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
WW 废水	2.28 ± 0.11	7.37 ± 0.32	0.17	45.00 ± 1.00	8.01
DY 废水	197 ± 25.06	211.33 ± 31.02	23.33 ± 2.30	244.00 ± 24.57	8.30

细胞密度与生物量随时间变化见图 1。由图 1(a) 可见, 试验初期, 小球藻与栅藻的细胞密度增加较快, 螺旋藻的细胞密度增加最慢, 推测原因可能与不同藻类对培养液微环境营养需求、吸收能力及适应过程有关。随着培养时间增加, 小球藻与栅藻细胞密度继续增加, 螺旋藻细胞密度开始降低, 分析原因一方面在接种初期藻细胞密度基数较小, 数量级为 10^5 左右; 另一方面藻类生长对培养基中各种有机物和无机物逐渐适应能力不同。由图 1(b) 可见, 随着培养时间延长, 藻类生物量逐渐增加, 在 14 d 左右达到最大值, 小球藻、栅藻和螺旋藻最大生物量分别为 0.26 g/L、0.28 g/L 和 0.20 g/L, 此后 3 种微藻的生物量均开始下降。

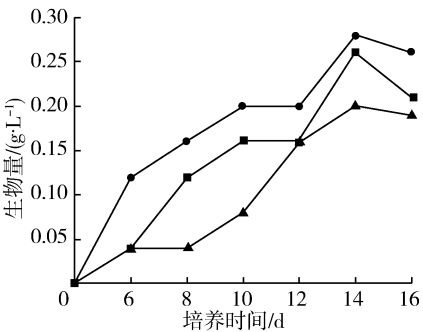
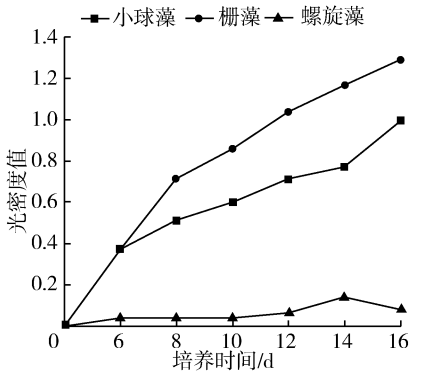


图 1 3 种微藻在 DY 废水中藻细胞密度与生物量随时间变化

在 WW 废水中, 小球藻、栅藻和螺旋藻 3 种微藻细胞密度与生物量随时间变化见图 2。由图 2(a) 可见, 栅藻在培养初期细胞密度增加最快, 其次为小球藻, 螺旋藻最慢; 随着培养液中营养物质的消耗, 藻密度增加幅度减小。由图 2(b) 可见, 试验初期 3 种微藻的生物量均持续增加, 螺旋藻的生物量在 14 d 后出现降低, 栅藻和小球藻的生物量在 16 d 达到最大值。

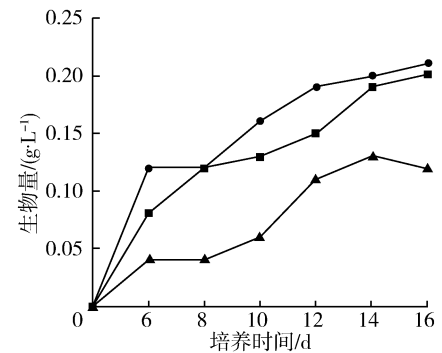
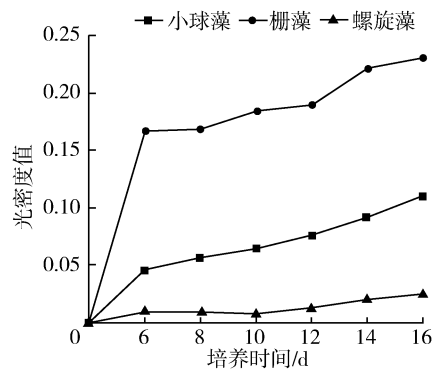


图 2 3 种微藻在 WW 废水中藻细胞密度与生物量随时间变化

胞密度增加较快, 螺旋藻细胞密度增加最慢。对于藻生物量, 3 种微藻在两种废水中表现有所不同, 3 种微藻在 DY 废水中均在 14 d 左右达到最大生物量, 此后生物量均有所降低; 在 WW 废水中, 小球藻和栅藻的生物量在试验期间一直持续增加, 而螺旋藻的生物量在 14 d 达到最大值, 之后开始下降。在培养 12 d 后, 3 种微藻在 DY 废水的累积量均大于其在 WW 废水中生物累积量, 分析原因可能与不同废水中营养盐含量、比例及营养物质消耗相关。

2.2 3 种微藻对龟鳖养殖废水中氮磷的去除

3 种微藻在两种废水中培养 16 d 后, 对培养液中 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果见图 3。由图 3 可见, 至培养结束时, 3 种微藻对 DY 废水与 WW 废水中 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均具有较高去除率。针对不同废水、不同营养盐, 3 种微藻去除效果有一定差异。

在 DY 废水中, 3 种微藻对废水中的 TN 和 TP 均具有较高去除率; 对废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果差别最大, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除能力从大到小依次为: 螺旋藻 > 小球藻 > 栅藻。螺旋藻对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除能力最强, 达到 91%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度由最初 2.28 mg/L 降到

试验结束时 0.21 mg/L。针对不同藻类去除不

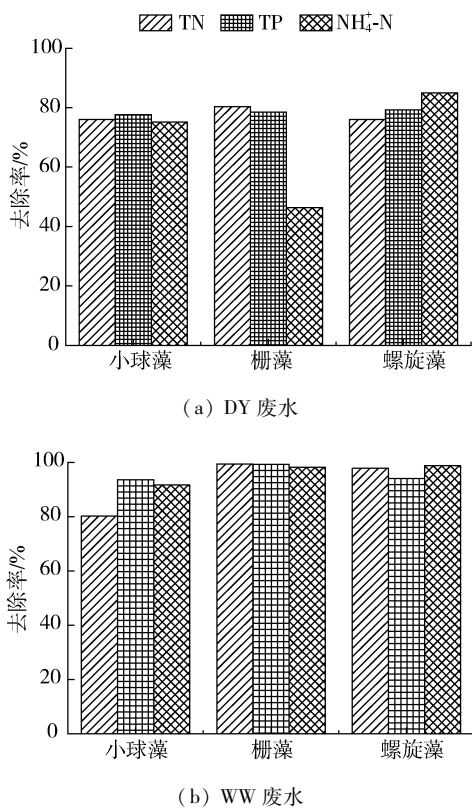


图3 3种微藻对两种废水中TN、TP和NH₄⁺-N去除效果

同营养盐能力比较,对TN、TP及NH₄⁺-N去除能力最高的微藻分别是栅藻、小球藻与螺旋藻,去除率分别为77.59%、80.32%和85.00%。

在WW废水中,3种微藻对废水中TN、TP及NH₄⁺-N去除率均达到80%以上。栅藻对TN、TP及NH₄⁺-N均有较高去除能力,培养至16d结束时,栅藻对TN、TP及NH₄⁺-N的去除率分别为93.65%、99.36%和94.13%,TN、TP及NH₄⁺-N的质量浓度分别降到1.67 mg/L、0.02 mg/L和1.45 mg/L。不同藻类去除不同营养盐能力不同,TN和TP易被栅藻去除,NH₄⁺-N易被螺旋藻去除。

综合上述分析,得出微藻对不同废水中氮磷去除效果存在差异,氮磷去除率从46.33%到99.46%不等,TP平均去除率要高于TN。此外,微藻对氮磷源去除效果与培养液中氮磷比例相关,如在WW废水中,NH₄⁺-N占TN比例为93.36%,而NH₄⁺-N易挥发性可能对TN去除贡献率很大。

3 讨论

藻类因自身特殊生理结构和新陈代谢能力,具有良好净化废水功能,利用微藻处理龟鳖养殖废水是一项污水资源化利用技术。有研究表明同浓度组蛋白核小球藻生长速率高于斜生栅藻,其

叶绿素a含量高于斜生栅藻,既生物量累积较高,且蛋白核小球藻脱氮除磷效应优于斜生栅藻^[10];章斐等^[11]在不同氮磷水平的城市二级出水中进行纯培养椭圆小球藻与斜生栅藻,结果发现椭圆小球藻生物量累积大于斜生栅藻;朱树峰等^[12]通过城市污水厂二级出水培养微藻试验结果表明,栅藻要高于小球藻生物质累积量。本试验结果表明,在相同初始氮磷浓度条件下,栅藻与小球藻均具有较高的生物量,均高于同浓度组螺旋藻,栅藻生物量累积较高,说明栅藻比小球藻整体生长更好,更能耐受极端环境,适应力更强。此外,不同微藻生长特性与光合作用相关,光合作用强弱与叶绿素含量相关,而绿藻门类群相对于其他微藻类群,叶绿素含量较高,所以光合作用旺盛^[13],在废水中具有较强的生长优势。本研究结果也证明这点,绿藻门类群栅藻与小球藻细胞密度增长与生物量累积均大于同浓度组中蓝藻门螺旋藻。螺旋藻除去其营养功能外还具有较好的净化污水能力,Deshmane等^[14]对螺旋藻净化废水效果研究发现,废水总氮去除率可达85%左右,利用养殖废水培养螺旋藻不仅能净化水质,也可以达到收获螺旋藻的目的,开展这方面研究很有必要。

近年来,针对如何高效利用微藻处理水产养殖废水,很多学者针对不同类型养殖废水筛选出具有高效去除能力的藻种。不同微藻对水产养殖废水中氮磷都有较强的去除能力,且不同微藻对废水中氮磷去除能力具有差异性。陈春云等^[15]模拟海水研究小球藻对工厂化对虾养殖废水中氮磷去除能力,结果显示小球藻对水体中的NH₄⁺-N去除能力达到80%,磷酸盐去除能力达85%以上,说明利用小球藻去除海水养殖水体富营养化是可行的。王伟伟等^[16]研究了小球藻、盐藻、三角褐指藻、湛江等鞭金藻4种微藻对不同大西洋鲑养殖废水中氮磷去除能力研究,发现4种微藻对各组废水中NH₄⁺-N去除效果有差异(30%~80%),但对磷去除效果显著,均在85%以上。在本研究中,小球藻、栅藻和螺旋藻对DY废水和WW废水氮磷去除能力具有一定差异性,但总趋势为微藻对不同废水氮磷源的净化优势基本一致,这与上述文献报道中的结果一致。

一般来说,初始浓度低的氮磷组合有助于提高去除率,而高浓度氮磷会影响藻类生长,不利于氮磷去除^[17]。在本研究中,微藻对不同初始浓度废水氮磷源去除率有一定差异,对初始浓度较高DY废水与初始浓度较低的WW废水,3种微藻的去除能力

差值 50% 左右。此结论与前人研究不同,分析原因可能与废水 pH 值、氮磷源比例及不同形态相关,一方面,藻类光合作用会使水体 pH 增大而呈弱碱性^[18],而弱碱性水环境有利于氨挥发,在 WW 废水中,氨态氮占总氮比例为 93.36%,碱性环境下氨态氮挥发对总氮去除贡献最大。因此,碱性水体、氨态氮挥发有利于微藻对总氮去除利用,极大提高微藻对氮磷吸收利用;另一方面,不同微藻对不同形态氮磷利用能力与废水中氮磷源比例有关^[19-20],所以在初始氮磷浓度较低、pH 值较高的 WW 废水中,3 种微藻对氮磷去除率均较高。

4 结 论

a. 小球藻、栅藻和螺旋藻 3 种微藻在不同龟鳖养殖废水中生长特性不同,DY 废水中 3 种微藻细胞密度与生物量均大于 WW 废水培养,最大生物量分别为 0.26 g/L,0.28 g/L 与 0.20 g/L。

b. 不同微藻对废水中氮磷去除效果各不相同,栅藻去除 TN 效果最好,最大去除率达到 93.65%,小球藻去除 TP 效果最好,最大去除率为 99.46%,螺旋藻最易去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,去除率最大达 98.79%。

c. 微藻用于龟鳖养殖废水水质生物净化有很好的应用前景,但本试验是在室内严格控制条件下,与实际应用环境具有一定的差异,在实际龟鳖养殖废水的处理应用与后续微藻收集等方面需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 王伟龙,范长健,石红,等. 一体式 MBR 对水产养殖废水处理操作参数优化的研究[J]. 淡水渔业,2015,45(3): 64-69. (WANG Weilong, FAN Changjian, SHI Hong, et al. Study on optimization of operational conditions of integrated membrane bioreactor applied to aquaculture wastewater [J]. Freshwater Fisheries, 2015, 45(3): 64-69. (in Chinese))

[2] 刘佳,易乃康,熊永娇,等. 人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响[J]. 环境科学,2016,37(9): 3430-3437. (LIU Jia, YI Naikang, XIONG Yongjiao, et al. Effects of constructed wetland configuration on the removal of nitrogen pollutants and antibiotics in aquaculture wastewater [J]. Environmental Science, 2016,37(9):3430-3437. (in Chinese))

[3] 邹万生,刘良国,张景来,等. 固定化藻菌对水产养殖废水氮、磷的去除效果[J]. 生态与农村环境学报,2010,

26(6): 574-578. (ZOU Wansheng, LIU Liangguo, ZHANG Jinglai, et al. Effect of immobilized algae-bacteria removing nitrogen and phosphorus from aquacultural wastewater [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2010,26(6):574-578. (in Chinese))

[4] 马牧源,崔丽娟,张曼胤,等. 白洋淀养鸭废水水质组成及其扩散和消减特征[J]. 水资源保护,2017,33(5): 145-153. (MA Muyuan, CUI Lijuan, ZHANG Manyin, et al. Water quality composition of duck farm wastewater in Baiyangdian Lake and its diffusion and reduction characteristics[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):145-153. (in Chinese))

[5] 杨柳燕,张文,陈乾坤,等. 大型水生植物的资源化利用[J]. 水资源保护,2016,32(5): 5-10. (YANG Liuyan, ZHANG Wen, CHEN Qiankun, et al. Resources utilization of macrophytes[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):5-10. (in Chinese))

[6] SIRAKOV I, VELICHKOVA K, STOYANOVA S, et al. The importance of microalgae for aquaculture industry. Review [J]. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies,2015,2(4):81-84

[7] 何思思,高保燕,雷学青,等. 初始硝酸钠浓度对魏氏真眼点藻的生长、形态和油脂积累的影响[J]. 水生生物学报,2015,39(3):574-582. (HE Sisi, GAO Baoyan, LEI Xueqing, et al. Effects of initial nitrogen supply on the growth, morphology and lipid accumulation of oleaginous microalga *Eustigmatos vischeri* (Eustigmatophyceae) [J]. Acta Hydrobiological Sinica,2015,39(3):574-582. (in Chinese))

[8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:210-281.

[9] 梁芳,鸭乔,杜伟春,等. 微藻光密度与细胞密度及生物质的关系[J]. 生态学报,2014,34(21): 6156-6163. (LIANG Fang, YA Qiao, DU Weichun, et al. The relationships between optical density, cell number, and biomass of four microalgae [J]. Acta Ecological Sinica, 2014,34(21):6156-6163. (in Chinese))

[10] 邓祥元,丁婉婉,樊玲波,等. 2 种微藻去除氮、磷能力的比较[J]. 吉林农业大学学报,2013,35(6):694-698. (DENG Xiangyuan, DING Wangwan, FAN Lingbo, et al. Comparative study on N and P removal ability of *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* [J]. Journal of Jilin Agricultural University,2013,35(6):694-698. (in Chinese))

[11] 章斐,陈秀荣,江子建,等. 不同氮磷浓度下 2 种无毒微藻的生长特性和脱氮除磷效能[J]. 环境工程学报,2015,9(2): 559-566. (ZHANG Fei, CHEN Xiurong, JIANG Zijian, et al. Growth characteristics and removal efficiency of nitrogen and phosphorus of two kinds of non-toxic microalgae under different nitrogen and phosphorus concentrations [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(2):559-566. (in Chinese))

(下转第 94 页)

- [23] QIN J, LI R, RAES J, et al. A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing [J]. Nature, 2010, 464: 59-65.
- [24] METCALF W W, GRIFFIN B M, CICCHILLO R M, et al. Synthesis of methylphosphonic acid by marine microbes: a source for methane in the aerobic ocean [J]. Science, 2012, 337: 1104-1107.
- [25] MACKELPRANG R, WALDROP M P, DEANGELIS K M, et al. Metagenomic analysis of a permafrost microbial community reveals a rapid response to thaw [J]. Nature, 2011, 480: 368-371.
- [26] WARNECKE F, LUGINBÜHL P, IVANOVA N, et al. Metagenomic and functional analysis of hindgut microbiota of a wood-feeding higher termite [J]. Nature, 2007, 450: 560-565.
- [27] 安虹, 邹广迅. 黄曲霉素毒性效应机制的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(24): 15007-15009. (AN Hong, ZOU Guangxun. Research progress of toxicological effects and mechanism of aflatoxin [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(24): 15007-15009. (in Chinese))
- [28] 熊琳, 冉玉平, 周光平. 马拉色菌属的分类及其在几种皮肤病的分布情况 [J]. 中华皮肤科杂志, 2000, 33(5): 318-320. (XIONG Lin, RAN Yuping, ZHOU Guangping. Study on taxonomy of the genus *Malassezia* and the distribution of it in some dermatoses [J]. Chinese Journal of Dermatoses, 2000, 33(5): 318-320. (in Chinese))
- [29] 龚弘强. 西藏地区青稞籽粒镰孢属真菌及其致病性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [30] 于洋, 王晓燕, 张鹏飞. 北运河水体浮游细菌群落的空间分布特征及其与水质的关系 [J]. 生态毒理学报, 2012, 7(3): 337-344. (YU Yang, WANG Xiaoyan, ZHANG Pengfei. Spatial distribution of planktonic bacterial community and its relationship to water quality in Beiyun River [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, 7(3): 337-344. (in Chinese))
- [31] 吴霞, 谢悦波. 直接投菌法在城市重污染河流治理中的应用研究 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(8): 3331-3336. (WU Xia, XIE Yuebo. Application of directly adding microbial agent to improve water quality of heavily polluted urban river [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(8): 3331-3336. (in Chinese))
- [32] 王亮. 规模化猪场养殖废水高效脱氮除磷技术探究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

(收稿日期: 2017-04-14 编辑: 徐 娟)

(上接第 87 页)

- [12] 朱树峰, 于茵, 胡洪营. 混合培养对城市污水厂二级出水培养能源微藻的生长促进作用 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 642-648. (ZHU Shufeng, YU Yin, HU Hongying. Effects on the growth characteristic by mixed culture of three energy microalgae species using domestic secondary effluent [J]. Ecology and Environmental Science, 2014, 23(4): 642-648. (in Chinese))
- [13] HUNER N P A, WILSON K E, MISKIEWICZ E, et al. Regulation of light harvesting in photosystem II of plants, green algae and cyanobacteria [M]. Singapore: World Scientific Publishers, 2015: 97-142.
- [14] DESHMANE A, NIMBALKAR D, NIKAM T D, et al. Exploring alternative treatment method for sugar industry effluent using "spirulina platensis" [J]. Sugar Technology, 2016, 18(1): 105-108
- [15] 陈春云, 庄源益, 方圣琼. 小球藻对养殖废水中 N、P 的去除研究 [J]. 海洋环境科学, 2009, 28(1): 9-11. (CHEN Chunyun, ZHUANG Yuanyi, FANG Shengqiong. Study on N, P removed in culturing wastewater by *Chlorella* [J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(1): 9-11. (in Chinese))
- [16] 王伟伟, 陈书秀, 钱瑞, 等. 海水养殖废水预处理方法与微藻藻种筛选 [J]. 水产科学, 2014, 33(3): 181-185. (WANG Weiwei, CHEN Shuxiu, QIAN Rui, et al. Mariculture effluent pretreatment methods and screening of microalgae [J]. Fisheries Science, 2014, 33(3): 181-185. (in Chinese))
- [17] 胡开辉, 朱行, 汪世华, 等. 小球藻对水体氮磷的去除效率 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2006, 35(6): 648-651. (HU Kaihui, ZHU Hang, WANG Shihua, et al. The removal effect of *Chlorella vulgaris* growth on nitrogen and phosphorus [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2006, 35(6): 648-651. (in Chinese))
- [18] SKRUPSKI B, WILSON K E, GOFF K L, et al. Effect of pH on neutral lipid and biomass accumulation in microalgal strains native to the Canadian prairies and the athabasca oil sands [J]. Journal of Applied Phycology, 2013, 25(4): 937-949.
- [19] MICHELON W, DA S M, MEZZARI M P, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on biochemical composition of microalgae polyculture harvested from phycoremediation of piggery wastewater digestate. [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2016, 178(7): 1-13.
- [20] 赵昕宇, 廖利民, 成杰, 等. 基于斜生栅藻培养的城市生活废水资源化利用研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 44-49. (ZHAO Xinyu, LIAO Limin, CHENG Jie, et al. Resource utilization of urban sewage water based on cultivation of *Scenedesmus obliquae* [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 44-49. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-02-08 编辑: 王 芳)