

营养物质和藻类在再生水制取及景观水体补给中的变化

王 怡¹, 郭晓瑜¹, 赵 超²

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安清远中水有限公司, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过实际监测了再生水处理单元中营养物质及藻生物量的沿程变化, 探讨了其相关性, 并以满足景观水体水质要求的再生水进行了静态模拟试验研究, 分析了氮、磷在水华形成过程中的演变规律。结果表明, 再生水制取过程中, 絮凝-沉淀对进水中的无机氮磷、藻密度和叶绿素 a 的去除发挥着主要作用, 其中对进水中藻密度和叶绿素 a 的去除率分别为 72.29 % 和 77.68 %, 出水中二者均值分别为 4.44×10^3 cells/mL 和 $5.97 \mu\text{g/L}$; 沿程的藻密度和叶绿素 a 与 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 TP 呈显著正相关(相关系数 $r > 0.80$)。模拟试验证明, 在炎热的夏季, 再生水静置 4 d 时, 藻华爆发, 优势藻主要为小球藻, 藻密度和叶绿素 a 浓度分别可达 8.08×10^5 cells/mL 和 $81.73 \mu\text{g/L}$, 为原水的 27.76 倍和 5.10 倍, 因此, 为有效降低景观水体藻类暴发增长的风险, 景观回用的再生水静止停留时间不宜超过 3 d。所得结论对城镇污水厂再生水回用景观水体水质目标控制具有实用价值。

关键词: 营养物质; 藻类; 再生水; 景观回用

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0105-06

Changes of nutrient and algae in the production of reclaimed water and the supply of landscape water

WANG Yi¹, GUO Xiaoyu¹, ZHAO Chao²

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

2. Xi'an Qingyuan Wastewater Treatment and Reuse Co. Ltd., Xi'an 710055, China)

Abstract: The changes of nutrients and algae concentration in the process of traditional reclamation treatment were monitored firstly and the correlation between them was discussed in this paper. Then, a static simulation test was conducted to reveal the evolution of nitrogen, phosphorus and algae with reclaimed water meeting the water quality standard for landscape reuse. The results showed that flocculation-precipitation played a major role in the removal of inorganic nitrogen and phosphorus, algal density and chlorophyll a during the process of reclaimed water preparation, which the removal rates of algae density and chlorophyll a were 72.29% and 77.68% respectively, and the average values of both them in the effluent were 4.44×10^3 cells/mL and $5.97 \mu\text{g/L}$, respectively. Meanwhile the algal density and chlorophyll were positively correlated with NH_4^+-N , $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ and TP $r > 0.80$. The simulating test showed that the algae density dominated by *Chlorella vulgaris* and chlorophyll a were up to 8.08×10^5 cells/mL and $81.73 \mu\text{g/L}$, which were 27.76 and 5.10 times of those in raw water, when the residence time of reclaimed water was 4 days in summer. Hence, in order to reduce the risk of algal outbreaks effectively, the residence time of reclaimed water for landscape reuse should not exceed 3 days. This conclusion is of important application value for controlling the reclaimed water quality of landscape reuse in the company dealing with wastewater treatment and reuse.

Key words: nutrients; algae; reclaimed water; landscape reuse

目前, 在我国北方缺水地区, 再生水补给景观水体是其回用的一个重要方向^[1]。但是, 再生水回用于景观水体时存在的环境风险^[2], 特别是夏季富营养化风险成为景观回用的最大障碍。大量研

究表明, 氮磷营养物质是水体发生富营养化的最大诱因, 因此, 《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921-2002)标准中对氮磷浓度限值提出了明确的要求, 但对浮游藻类并未关注。本

研究通过对西安某再生水厂处理单元中营养物质及藻类浓度的沿程变化,以满足景观回用的再生水为模拟景观补给水进行了静态试验,并着重分析了营养物及藻类在夏季的演变规律。该研究首次揭示了污水深度处理过程以及再生水景观回用中浮游藻类的演变规律及其氮磷营养物浓度的变化,对我国再生水制取工艺优化以及再生水景观回用水质控制均具有一定的意义。

表 1 西安市某再生水厂出水水质

Tab. 1 Water quality of wastewater treatment and reuse plant in Xi'an

项目	pH	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	TP	TN
再生水	7.66 ± 0.14	3.68 ± 2.01	3.84 ± 2.44	0.91 ± 0.20	0.26 ± 0.22	0.38 ± 0.10	8.43 ± 2.54

1.2 试验设计及水样采集

本研究分两部分。第一部分通过再生水制取过程中水质的沿程监测,分析营养物及浮游藻类在再生水制取过程中的演变。该试验于 2016 年 7 月到 8 月进行,水样依次在再生水水厂的进水口及斜板沉淀、砂滤池和氯化消毒池出水口于 9:00~11:00 am 之间采集,每个位置每次采集水样 2 L。第二部分以满足景观回用的再生水为模拟景观水体补给水,通过连续静态试验,监测模拟景观水体中营养物及浮游藻类随时间的变化规律。实验装置为一个四周遮光、直径 400 mm、高 420 mm、体积为 50 L 的容器,向装置中加入再生水处理厂满足景观回用标准的再生水,并置于并置于户外环境模拟景观水体。试验进行 12 d,

1 材料与方法

1.1 试验水源

试验水源为西安市某再生水水厂,该水厂以西安市某城市污水处理厂二级处理出水为进水,经过预氯化、絮凝-沉淀、过滤和消毒工艺处理单元制取再生水,再生水厂出水水质指标如表 1 所示,试验环境气温为 28 ± 4 °C。

每隔 2 d 采集一次水样用于水质监测,定期加入同样质量的再生水以补充蒸发导致的水量损失使模拟系统水量稳定。

1.3 测定项目及方法

水质测定项目包括藻密度、叶绿素 a、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、TN 和 TP,具体测定方法如表 2 所示。测定藻密度前需先用鲁哥试剂现场固定;测定叶绿素 a 前水样需先经暗适应处理;测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的水样先经 $0.45 \mu\text{m}$ 的膜过滤;TN 和 TP 可直接测定。测定中除了藻密度采用 Nikon50i 显微镜、叶绿素 a 采用 TDF-3DC 延迟荧光仪外,其余均采用 XINMAO752N 分光光度计。

表 2 测定项目及方法

Tab. 2 Parameters and methods of water quality

项目	测定方法	项目	测定方法
藻密度	镜检计数法	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	钼锑抗分光光度法
叶绿素 a	延迟荧光法	TN	碱性过硫酸钾氧化分光光度法
NH_4^+-N	纳氏试剂分光光度法	TP	过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法
NO_3^--N	紫外分光光度法		

2 结果与讨论

2.1 再生水制取过程中水质的沿程变化

2.1.1 再生水制取过程中氮磷的沿程变化

图 1 所示为再生水制取过程中氮磷浓度的沿程变化。

从图 1(a)可以看出,再生水制取过程中 TN 和 NH_4^+-N 浓度沿程变化趋势基本相似,即进水经絮凝-沉淀后二者浓度均显著降低,分别从均值 8.83 mg/L 和 7.33 mg/L 下降到 7.54 mg/L 和 5.41 mg/L ,分别降低了 38.73% 和 26.19%;之

后, TN 浓度在过滤阶段略有回升,经消毒处理后变化很小;而 NH_4^+-N 浓度在絮凝-沉淀后变化幅度很小,趋于相对稳定。然而, NO_3^--N 浓度在絮凝-沉淀及砂滤阶段,均呈缓慢增加趋势,在过滤流程后略有下降。 NO_3^--N 浓度在絮凝-沉淀及砂滤增加的原因,可能由于该再生水水源为氧化沟工艺的城市污水处理厂出水,该工艺是以硝化反硝化为主要流程的处理单元,硝化菌必然是该污水处理系统的主导微生物。尽管污水处理厂出水设有消毒工艺,但是由于水中 persister 菌^[3-4]的普遍存在,一部分 persister 硝化菌不可避免地进入到再

生水处理流程,并在低有机碳和一定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下发生了硝化作用,导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度升高。

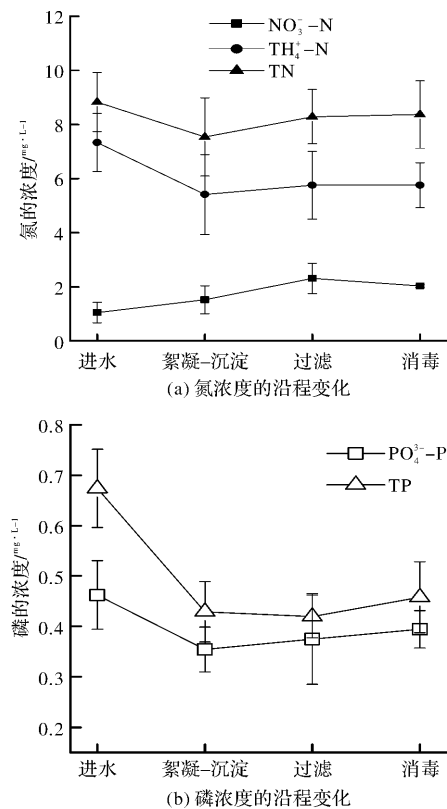


图 1 再生水制取过程中氮磷浓度的沿程变化
($n=3$, 试验重复次数)

Fig. 1 Change of nitrogen and phosphorus concentrations in the process of preparing reclaimed water($n=3$)

从图 1(b)可以看出,经絮凝-沉淀后进水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 浓度迅速下降,分别从平均值 0.46 mg/L 和 0.67 mg/L 下降到 0.35 mg/L 和 0.43 mg/L ,分别降低了 23.91% 和 35.82% ,证明了磷主要通过絮凝和沉淀形成不溶性磷酸盐得以去除^[5]。然而,经消毒处理后,最终出水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 浓度的均值分别为 0.39 mg/L 和 0.45 mg/L ,两者浓度均有升高。殷娣娣^[6]等通过研究不同预氧化剂对藻细胞的处理效果,结果发现次氯酸钠较易引起藻细胞萎缩破裂,从而导致细胞内代谢有机质(IOM)的释放,这些物质的释放无疑会增大水中磷的浓度。因此,再生水在消毒处理阶段磷浓度略有升高的原因可能由于消毒剂将微量生物体灭活释磷所致。

2.1.2 再生水制取过程中藻类及叶绿素 a 的沿程变化

由于藻密度和叶绿素 a 是再生水景观回用水质中未被纳入的指标,因此,也是长期被忽视的指标,图 2 所示为再生水制取过程中藻密度和叶绿素 a 的沿程变化。

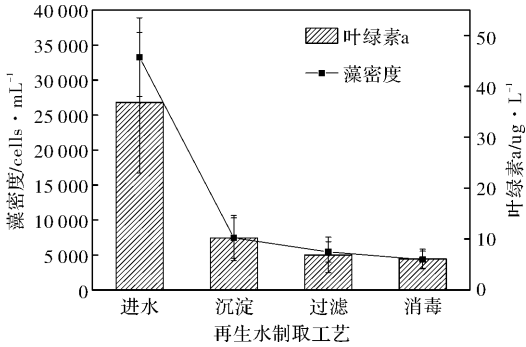


图 2 再生水制取过程中藻密度和叶绿素 a 的变化($n=3$)
Fig. 2 Changes of algal density and chlorophyll a in the process of preparing reclaimed water($n=3$)

从图 2 可以看出,再生水制取过程中,藻密度和叶绿素 a 浓度一直存在,且均沿程降低。首先,进入再生水处理系统的藻密度均值为 $2.68 \times 10^4\text{ cells/mL}$,经过絮凝-沉淀后,藻密度均值下降至 $7.43 \times 10^3\text{ cells/mL}$,降低了 72.29% 。与此同时,叶绿素 a 浓度在进水中均值为 $45.75\text{ }\mu\text{g/L}$,经过絮凝-沉淀后下降至 $10.21\text{ }\mu\text{g/L}$,降低 77.68% 。此后,过滤和消毒工艺对藻密度和叶绿素 a 浓度的降低幅度很小,最终的再生水出水中藻密度和叶绿素 a 浓度均值分别为 $4.44 \times 10^3\text{ cells/mL}$ 和 $5.97\text{ }\mu\text{g/L}$ 。

目前,国家颁布的《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921-2002)标准并未对再生水出水中的藻密度和叶绿素 a 浓度限值提出要求。但是,早在 1982 年,OECD(经合组织)提出若水体中叶绿素 a 浓度 $>8\text{ }\mu\text{g/L}$ 时即为富营养化^[7]。因此,当将含有一定量的藻细胞的再生水作为景观水体的水源时,这无异于为景观水体接种了能够耐受不良条件(比如消毒)的藻种,因而可能增大被补充景观水体发生富营养化的风险。

2.1.3 再生水制取过程中藻密度、叶绿素 a 和氮磷浓度的相关性分析

表 2 所示为再生水处理单元中藻密度、叶绿素 a 和氮磷营养物质浓度的相关性 r 的结果。

表 2 再生水制取过程中藻密度、叶绿素 a 和氮磷浓度的相关性

Tab. 2 The correlation coefficient of algae density, chlorophyll a and nutrient concentrations during the process of preparing reclaimed water

项目	氮磷营养物质				
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	TN	TP
藻密度	+0.91	-0.74	+0.80	+0.39	+0.96
叶绿素 a	+0.92	-0.72	+0.83	+0.42	+0.97

注:“+”表示正相关,“-”表示负相关

从表 2 可以看出,藻密度和叶绿素 a 浓度与 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 TP 呈显著正相关($r>0.80$),与 NO_3^--N 呈显著负相关(大约 -0.73),而与 TN 无显著相关,韩志萍^[8]等对南太湖口蓝藻生物量与氮磷相关性的研究表明,蓝藻生物量与 TN 呈负相关或不相关,与 TP 呈正相关. 本研究结果表明,再生水制取过程中影响藻密度和叶绿素 a 的主要水质因子为 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 TP. 因此,为控制再生水出水中的藻密度和叶绿素 a 浓度及景观水体的富营养化,再生水制取过程中应该主要降低氨氮和磷的浓度.

2.2 模拟再生水回用于景观水中水质的历时变化

2.2.1 模拟景观水中氮磷浓度的历时变化

图 3 所示为再生水作为补给水的模拟景观水中氮磷浓度的历时变化. 从图 3(a)可以看出,在模拟景观水中, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度变化趋势不同, NH_4^+-N 在前 4 d 急剧下降,由初始值 0.97 mg/L 降至 0.22 mg/L ,此后,虽略有波动,但相对稳定;而 NO_3^--N 在前 4 d 基本维持初始水平,之后开始逐渐下降,从 3.19 mg/L 降至 1.32 mg/L ,直至 10 d 后相对平缓. TN 浓度大幅下降主要发生在第 2 d 到第 6 d,此后持续下降. 模拟景观水中不同形态氮浓度衰减的时间差异,可能与藻类对不同氮的利用次序有关, Lee 等^[9]研究表明在藻生长的过程中, NH_4^+-N 比 NO_3^--N 更易被藻类吸收,这是因为细胞在吸收 NO_3^--N 时需先经硝酸还原酶或谷氨酰胺酶将其还原为 NH_4^+-N 后才被利用^[10]. 从图 3(b)可以看出,再生水中的 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度在 6 d 内均大幅下降,前者从初始 0.44 mg/L 降至 0.28 mg/L ,后者由 0.33 mg/L 下降至 0.05 mg/L . 6 d 后,水中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度基本稳定,TP 浓度虽有波动但总体下降.

2.2.2 模拟景观水中藻类的演变

(1) 藻细胞密度和叶绿素 a 的历时变化

模拟景观水中藻细胞密度及叶绿素 a 浓度随时间的变化如图 4 所示,试验期间环境温度为 $28\sim 34\text{ }^\circ\text{C}$,自然光照充分. 从图 4 可以看出,再生水补给的模拟景观水中藻细胞生长曲线和叶绿素 a 浓度变化趋势比较相似,即在前 2 d,二者均维持了较低的浓度,第 2 d 到第 4 d 均出现爆发式增长,但区别在于藻密度在第 4 d 达最大值 $8.08\times 10^5 \text{ cells/mL}$ 而叶绿素 a 在第 6 d 达最大值 $81.73 \text{ } \mu\text{g/L}$,

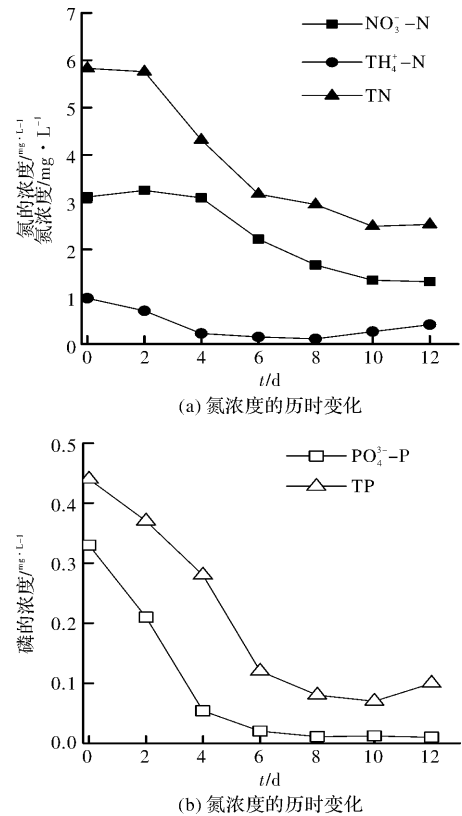


图 3 再生水为补给水的模拟景观水中氮磷浓度的历时变化($n=3$)

Fig. 3 Variation of nitrogen and phosphorus concentrations in the simulated landscape water supplied with reclaimed water

达最大值后,两者均快速衰减,第 10 d 后基本稳定,但该稳定值高于补充前 2 d 的稳定值,其中藻密度和叶绿素 a 浓度分别为初始的 27.76 倍和 5.10 倍. 结合图 3 氮磷浓度的变化,可认为,在模拟景观水中氮磷浓度大幅下降的前 4 d,也是藻细胞密度迅速增长的时期,说明藻类的大量生长繁殖将导致水中氮磷营养物质的消耗,所以可将氮磷在短期内快速下降的现象作为再生水景观回用藻华爆发的预警参考. 但是,藻密度和叶绿素 a 的最大值对应时间并非一致,前者出现在第 4 d 后者出现在第 6 d,说明水中叶绿素 a 浓度与藻密度可能存在时差,杜胜蓝^[11]和王伟^[12]对浮游植物生物量和叶绿素 a 的相关性研究结果表明当水体中优势藻种发生明显变化时二者相关性不显著甚至不相关.

因此,即使是完全达标的再生水补充入景观水体,在炎热的夏季,4 d 的停留时间将可能导致水体严重的富营养化,即使这时水中氮磷浓度相对原水更低. 国家颁布的《城市污水再生利用景观

环境用水水质》标准(GB/T 18921-2002)中规定,当完全使用再生水作为景观湖泊类水体的补充水且水温超过 25 ℃ 时,其静止停留时间不宜超过 3 d. 本试验证明,在炎热夏季,再生水回用于封闭的或流动性较差的景观水体后停留时间不宜多于 3 d.

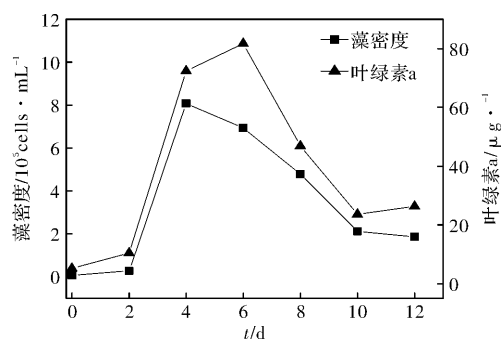


图4 再生水为补给水的模拟景观水中藻密度和叶绿素 a 的历时变化 ($n=3$)

Fig. 4 Variation of algal density and chlorophyll a in the simulated landscape water supplied with reclaimed water

(2) 优势藻种相对丰度历时变化

图5所示为模拟景观水中优势藻种相对丰度的历时变化. 从图5可以看出,模拟景观水中优势藻种相对单一,且相对丰度随再生水停留时间而存在一定差异. 原始再生水几乎全部为绿藻门的小球藻; 4 d后,小球藻、新月藻(绿藻门)和囊裸藻(裸藻门)的相对丰度分别为 61%、17%和 15%,小球藻的优势略有下降并持续到第8 d; 12 d后,尽管藻细胞数目大幅减少但仍有新的节旋藻属(蓝藻门)出现. 总之,以再生水为补给的模拟景观水中,虽然出现了不同藻种的交替更新,但是优势藻基本为小球藻,其原因之一在于再生水原水主要以小球藻为主,其二与小球藻自身生长繁殖速度快、适应环境能力强的生理优势有关^[13-14].

3 结论

(1)再生水制取过程中,絮凝-沉淀过程对进水中的无机氮磷、藻密度和叶绿素 a 去除发挥着主要作用,其对进水中藻密度和叶绿素 a 的去除率分别为 72.29%和 77.68%,最终的再生水出水中藻密度数量级为 10^3 而叶绿素 a 的平均浓度低于 8 $\mu\text{g/L}$.

(2)再生水制取过程中,沿程的藻密度和叶绿素 a 与 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 TP 之间呈显著正相关,因此,为控制再生水出水中的藻密度和叶绿

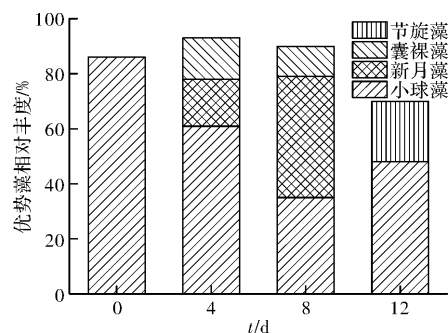


图5 再生水补给的模拟景观水中优势藻种相对丰度历时变化

Fig. 5 Variation of the relative abundance of dominant algae species in the simulated landscape water supplied with reclaimed water

素 a 浓度,再生水制取过程中应该主要控制氨氮和磷的浓度.

(3)本试验证明,在炎热夏季,应该严格执行静止停留时间不宜超过 3 天的标准要求.

(4)以再生水为补充水的景观水中,尽管藻类随时间出现交替更新,但是优势藻基本为小球藻,因此,以城市污水厂二级出水制取的再生水为景观水体补给水时,应重点防止绿藻尤其是小球藻的过度生长繁殖.

参考文献 References

- [1] YI L, JIAO W, CHEN X, et al. An overview of reclaimed water reuse in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(10): 1585.
- [2] TOZE S. Reuse of effluent water: benefits and risks [J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/3): 147-59.
- [3] 龙冬艳, 胡少平, 陈新才, 等. 持留菌及其对微生物膜的耐受性影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2707-14.
LONG Dongyan, HU Shaoping, CHEN Xincan, et al. Persisters and their effects on microbial biofilm tolerance: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2707-14.
- [4] 祝泽兵, 吴晨光, 钟丹, 等. 寒区湖库型水源供水系统中耐氯菌的生长[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(8): 1-6.
ZHU Zebing, WU Chenguang, ZHONG Dan, et al. The growth of chlorine bacteria in water supply sourced from lakes and reservoirs in cold region[J]. Journal of Haebin Institute Technology, 2015, 47(8): 1-6.

- [5] 陈义, 鲍治宇, 黄鹏, 等. 再生水回用中混凝强化除磷的技术研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(8): 110-3.
CHEN Yi, BAO Zhiyu, HUANG Peng, et al. Study on the technology of enhanced phosphorus removal in reclaimed water reuse[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(8): 110-3.
- [6] 殷娣娣, 陆纳新, 袁君, 等. 不同预氧化剂对铜绿微囊藻细胞的灭活[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(2): 74-8.
- [7] OECD. Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control. Final Report, OECD Cooperative Program on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, OECD, Paris, 1982: 154.
- [8] 韩志萍, 邵朝纲, 张易祥, 等. 南太湖入湖口蓝藻生物量与氮营养因子的年变化特征以及相关性研究[J]. 水产学报, 2012, 36(5): 911-8.
HAN Zhiping, SHAO Chaogang, ZHANG Yixiang, et al. Annual variation and correlation of Cyanobacteria Biomass and nitrogen nutrient in South Lake Taihu [J]. Journal of Fisheries Of China, 2012, 36(5): 911-8.
- [9] LEE J, PARKER A E, WILKERSON F P, et al. Uptake and inhibition kinetics of nitrogen in *Microcystis aeruginosa*: Results from cultures and field assemblages collected in the San Francisco Bay Delta, CA[J]. Harmful Algae, 2015, 47(2): 126-140.
- [10] DUGDALE R C, WILKERSON F P, HOGUE V E, et al. The role of ammonium and nitrate in spring bloom development in San Francisco Bay[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2007, 73(1/2): 17-29.
- [11] 杜胜蓝, 黄岁樑, 臧常娟, 等. 浮游植物现存量表征指标间相关性研究 II: 叶绿素 a 与藻密度[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(2): 44-9.
DU Shenglan, HUANG Suiliang, ZANG Changjuan, et al. Coerlation between the indicators of phytoplankton standing stock: chlorophyll a and biomass [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(2): 44-9.
- [12] 王伟, 顾继光, 韩博平. 华南沿海地区小型水库叶绿素 a 浓度的影响因子分析[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(1): 64-71.
WANG Wei, GU Jiguang, HAN Boping. Analysis of factors affecting chlorophyll a concentration in small reservoirs in south China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2009, 15(1): 64-71.
- [13] RAI U N, SINGH N K, UPADHYAY A K, et al. Chromate tolerance and accumulation in *Chlorella vulgaris* L.: role of antioxidant enzymes and biochemical changes in detoxification of metals [J]. Bioresource Technology, 2013, 136C(5): 604-9.
- [14] 欧阳峥嵘, 温小斌, 耿亚红, 等. 光照强度、温度、pH、盐度对小球藻(*Chlorella*)光合作用的影响[J]. 植物科学学报, 2010, 28(1): 49-55.
OUYANG Zhengrong, WEN Xiaobin, GENG Yahong, et al. The effects of light intensities, temperatures, pH and salinities on photosynthesis of *Chlorella* [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2010, 28(1): 49-55.

(编辑 桂智刚)