

不同工艺再生水补给对景观湖水质变化的影响

李娜¹ 杨建^{2*} 常江² 甘一萍² 吕刚¹

(1. 海南医学院热带医学与检验医学院, 海口 571199; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124)

摘要 再生水回用于景观水体过程中, 为了比较不同再生水工艺对景观水体富营养化的影响, 以“二级出水 + BAF + O_3 + GFH”和“二级出水 + O_3 ”作为再生水处理工艺, 以岸滤(bank filtration, BF)作为水质维持工艺, 进行再生水景观水体水质保障技术研究。结果表明, “二级出水 + O_3 ”出水流量较大, 水力流动快, 每天运行 24 h, 平均出水流量 $25.5 \text{ m}^3/\text{d}$, 氮磷含量偏高; “二级出水 + BAF + O_3 + GFH”出水的氮磷指标控制在较低水平, GFH 出水流量 $8 \sim 14 \text{ m}^3/\text{d}$, 水力流动较缓, 湖中出现蓝藻。2 套系统中 BF 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别为 30.5% 和 20.8%。“二级出水 + O_3 + BF”系统中人工湖进水 TN 平均浓度 24.309 mg/L , TP 平均浓度 0.583 mg/L , N/P = 41, 适宜水藻生长, 对湖中 N (主要是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、P 有较强的去除能力; “二级出水 + BAF + O_3 + GFH + BF”系统中人工湖进水 TP < 0.05 mg/L , 适宜蓝藻生长。

关键词 再生水 景观水 河岸渗滤 水质保障 藻类

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)04-1276-05

Effect of recharge of reclaimed water with different processes on water quality change of landscape lake

Li Na¹ Yang Jian² Chang Jiang² Gan Yiping² Lü Gang¹

(1. Institute of Tropical Medicine and Inspection Division, Hainan Medical College, Haikou 571199, China;

2. Beijing Drainage Group Company Limited, Beijing 100124, China)

Abstract In the process of reclaimed water reused for landscape, in order to compare the effect on quality change of landscape lake recharged by reclaimed water with different processes, “municipal secondary effluent + BAF + ozonation + GFH” and “municipal secondary effluent + ozonation” were used as reclaimed water treatment processes respectively, while bank filtration was used as landscape quality maintenance technology, then the technology of reclaimed water quality control for landscape was studied. The result showed that the discharge of effluent of “municipal secondary effluent + ozonation” was larger which caused water flow fast. The average water flow was $25.5 \text{ m}^3/\text{d}$ when the system run 24 hours everyday. However, the concentrations of nitrogen and phosphorus were both higher. For the effluent of “municipal secondary effluent + BAF + ozonation + GFH”, the concentrations of nitrogen and phosphorus were controlled at lower level. The effluent flow of GFH ranged from 8 to $14 \text{ m}^3/\text{d}$, which led to slow water flow. Algae were detected in artificial lake. The removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were 30.5% and 20.8%, respectively by BF in two systems. In the system of “municipal secondary effluent + ozonation”, the TN average concentration of artificial lake influent was 24.309 mg/L , TP was 0.583 mg/L and N/P was 41 which were suitable for growth of hydrodictyon reticulatum. Hydrodictyon reticulatum had strong removal ability of nitrogen (mainly $\text{NH}_4^+ - \text{N}$) and phosphorus in lake. In the system of “municipal secondary effluent + BAF + ozonation + GFH”, TP concentration of artificial lake influent was less than 0.05 mg/L , which was suitable for growth of cyanobacteria.

Key words reclaimed water; landscape water; bank filtration; water quality control; algae

随着社会经济的快速发展, 水资源短缺和水环境污染问题日趋严重^[1]。许多水资源短缺、城市缺水问题突出的国家, 对水资源的总体战略目标都进行了相应的调整, 将单纯的水污染控制转变为全方位的水环境可持续发展^[2]。再生水回用作为解决城市用水矛盾的根本措施和保证城市发展的基本策略, 应对水资源危机时具有其他策略方法无可比拟

的优势^[3]。再生水回用过程中, 作为补给水源回用

基金项目: 科技部国际合作重点项目 (2007DFB90460)

收稿日期: 2011-04-29; 修订日期: 2011-06-17

作者简介: 李娜 (1986~), 女, 硕士, 助教, 主要从事景观水体污染控制研究工作。E-mail: oknana@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yangjian@bdc.cn

于城市景观水体,国内外许多城市已有成功案例,有效改善了城市景观环境。但是与自然河流相比,再生水中的污染物本底值较高、水体自净能力较差,更易发生富营养化。另外,单独的二级处理和包括脱氮除磷工艺的二级强化处理远不能达到景观回用的水质标准,尤其氮、磷指标更是与再生水景观回用要求相差甚远^[4]。因此,必须在二级处理后增加深度处理工艺,以提高景观水体源水水质。

本研究建立了两套不同的再生水景观回用水质保障系统。第一套保障系统(简称系统1)以“污水处理厂二级出水+臭氧”工艺出水作为人工湖源水,在人工湖一侧岸边设置岸滤系统,对人工湖中湖水进行岸滤净化,并将岸滤出水回流至源水进水端,使湖水形成水力循环。第二套保障系统(简称系统2)以“污水处理厂二级出水+曝气生物滤池(biological aerated filter,BAF)+臭氧”工艺出水作为源水,经微滤+GFH(granulated ferric hydroxide)处理,最终出水作为景观水体补水水源,在人工湖一侧设置与系统1相同的岸滤(bank filtration,BF)系统。2套保障系统的岸滤体积、高度、砂颗粒介质均相同。通过对比两套再生水景观回用水质保障系统的运行效果,分析景观湖发生富营养化的原因,为解决再生水源景观湖富营养化问题提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

臭氧可以氧化分解水中的有毒、有害有机物,去除臭味和色度并具有广谱灭菌消毒功能。本研究中臭氧投加量4 mg/L,臭氧发生器型号CF-G-2-500G(青岛国林实业有限责任公司)。防止水体富营养化的关键措施是控制水体中氮、磷等营养盐浓度,从源水控制营养物质向人工湖的排放。系统1与系统2两套保障系统的主要区别是系统2人工湖进水工艺除臭外,还采用BAF和GFH前处理工艺。BAF工艺主要去除水中氨氮和有机物,本实验中曝气生物滤池为长方体钢制罐体,长宽高分别为1.8、1.4和6 m,填料为膨胀黏土(expanded clay),粒径2.5~5 mm,密度1 200~1 400 kg/m³,装填高度为3 m。砂滤池容积为1.5 m³。GFH工艺主要去除进水中磷^[5],GFH多孔吸附剂主要成分是 β -FeOOH^[6],比表面积250~300 m²/g^[7],粒径0.32~2.0 mm,可利用的吸附部位密度非常高,因此具有很高的吸附容量^[8]。GFH去除磷的机理就是将磷吸附在GFH颗

粒表面,形成络合物^[9]。增加BAF和GFH前处理工艺会将氮磷营养盐控制在较低水平,但由于GFH处理量的限制,会减小人工湖进水量。

2套水质保障系统均采用岸滤净化人工湖水质。岸滤是指河水补给地下水时,经河床含水层过滤,进入地下水或两岸抽水井的过程^[10]。用于岸滤的河床含水层以砂和砾石为主^[11,12]。岸滤可去除天然有机物(NOM)、合成有机物(SOC)、氮、颗粒物和病原微生物等多种污染物。为保证岸滤长时间有效运行,采用普通河砂堆积而成,粒径大小不一,包括小颗粒砂砾和细砂,砂坝长7 m、下底宽5 m、上顶宽4.5 m、高1.2 m,总体积40 m³,上部和临水部分用无纺布包裹,以免降雨和湖水冲刷流失。

1.2 实验方法

实验中试人工湖总面积约250 m²,湖深0.5~1 m。系统1平均补水量25.5 m³/d,人工湖水经岸滤进一步净化后,通过集水管收集并溢流入岸滤池,通过回流泵将约10 m³/d的岸滤出水循环回补水端。系统2中GFH吸附柱出水流量为8~14 m³/d(即0.83~1.46 BV/h),BF工艺出水流量为5~21 m³/d;微滤装置用于去除再生水中悬浮颗粒物,减少GFH堵塞。

1.3 分析方法

TP的检测采用“过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法(A)”,NH₄⁺-N采用“纳氏试剂光度法(A)”检测,叶绿素-a的测定采用“乙醇萃取分光光度法”,TP、NH₄⁺-N、叶绿素-a所用检测设备均为vis-723型可见分光光度计(北京瑞利分析仪器公司);藻类生物量的检测采用干重法测定,UV₂₅₄的检测采用Evolution 60紫外可见光度计(德国Thermo Fisher Scientific公司);水样经0.45 μm滤膜过滤,取滤出液用multi N/C 2100专家型总有机碳/总氮分析仪(德国耶拿分析仪器股份公司)检测TN;NO₂⁻-N和NO₃⁻-N的测定采用离子色谱法,所用检测设备为Deagent-Free Controller(戴安中国有限公司);COD的检测采用COD快速测定仪法,检测仪器5B-3(C)型快速测定仪(连华科技有限公司)。

2 结果与讨论

2.1 进水水质特征

由于增加了BAF和GFH处理工艺,系统2的人工湖源水水质显著优于系统1(见表1),NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP、SS、COD浓度均有一定程度降低。系统

1 和系统 2 再生水平平均温度分别为 24.6℃ 和 24.8℃,DO 平均值分别为 7.89 mg/L 和 8.51 mg/L。

表 1 2 套保障系统进水水质特征

Table 1 Characteristics of reclaimed water from two treatment systems				
检测项	系统 1		系统 2	
	范围	均值	范围	均值
pH	7.35 ~ 8.04	7.89	7.78 ~ 8.96	8.51
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.100 ~ 1.499	0.365	0.071 ~ 1.856	0.288
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	10.29 ~ 29.52	21.318	1.208 ~ 25.32	13.070
TP (mg/L)	0.14 ~ 1.02	0.583	0.059 ~ 0.725	0.285
SS (mg/L)	4.41 ~ 11.68	8.52	0.40 ~ 7.33	5.78
COD (mg/L)	11.9 ~ 67.4	22.2	15.2 ~ 32.0	19.1

2.2 氮磷变化规律

2.2.1 氮

系统 1 中人工湖进水 NH₄⁺-N 平均浓度 0.365 mg/L,BF 出水 NH₄⁺-N 平均浓度 0.089 mg/L,BF 对 NH₄⁺-N 的去除率为 30.5%;系统 2 中由于 BAF 对氨氮的去除效果较好,人工湖进水 NH₄⁺-N 浓度较低(平均浓度 0.288 mg/L),经 GFH 吸附柱后,NH₄⁺-N 平均浓度降至 0.221 mg/L(去除率 23.3%),BF 可使出水中 NH₄⁺-N 浓度进一步降低至 0.156 mg/L(去除率 20.8%)。从图 1 看出,系统 2 中人工湖 NH₄⁺-N 浓度比系统 1 更稳定,系统 1 人工湖 NH₄⁺-N 平均浓度为 0.128 mg/L,系统 2 人工湖 NH₄⁺-N 平均浓度 0.191 mg/L,比系统 1 高出 49.2%。7 月下旬人工湖中出现水网藻,NH₄⁺-N 浓度开始有所下降,这是由于水网藻一般优先利用 NH₄⁺-N 和其他还原态氮,当 NH₄⁺-N 浓度很低或耗尽时,才利用 NO₃⁻-N^[13]。相比较 GFH 出水,系统 2 人工湖 NH₄⁺-N 浓度的升高则是蓝藻固氮作用所致,人工湖出现成形的铜绿微囊藻和小球藻(均属蓝藻藻属),蓝藻具有固氮作用,可以将分子态氮合成氨和其他含氮有机化合物^[14]。

两系统人工湖 NO₃⁻-N 浓度相差悬殊,系统 1 与系统 2 人工湖 NO₃⁻-N 平均浓度分别为 18.041 mg/L 和 2.18 mg/L。系统 1 进水 NO₃⁻-N 的平均浓度是 21.318 mg/L,BF 对 NO₃⁻-N 的去除率不高,人工湖中水网藻可吸收 NO₃⁻-N,而 NH₄⁺-N 氮源充足则会降低水网藻对 NO₃⁻-N 的吸收能力,图 1 和图 2 中系统 1 人工湖 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度的变化趋势相似,实验中期水网藻大量繁殖,NH₄⁺-N 被消耗后,水

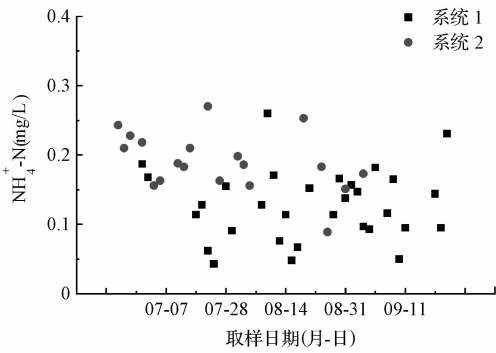


图 1 2 个系统人工湖内 NH₄⁺-N 浓度比较

Fig. 1 Comparision of NH₄⁺-N concentration of artificial lake in two treatment systems

网藻开始以 NO₃⁻-N 为氮源,NO₃⁻-N 浓度降低^[13]。系统 2 中人工湖进水 NO₃⁻-N 平均浓度为 13.07 mg/L,经过 GFH 吸附处理后升至 14.388 mg/L,同时 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度则出现降低,这是由于 GFH 为强氧化性材料,将 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 氧化为 NO₃⁻-N。经 BF 处理后,NO₃⁻-N 浓度几乎不变,降至 2.11 mg/L(NO₃⁻-N 去除率 2.8%),人工湖 NO₃⁻-N 浓度大幅下降,主要原因是蓝藻以 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 为营养物质,使 NO₃⁻-N 降至 2.176 mg/L(去除率 84.9%)。

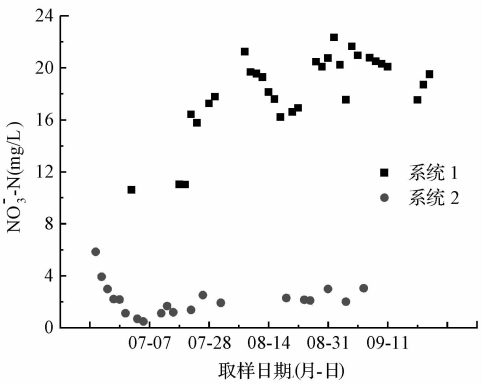


图 2 2 个系统人工湖内 NO₃⁻-N 浓度比较

Fig. 2 Comparision of NO₃⁻-N concentration of artificial lake in two treatment systems

2.2.2 磷

系统 1 进水 TP 浓度较高(平均浓度 0.583 mg/L),人工湖 TP 浓度 0.193 mg/L(图 3,TP 去除率 66.9%),BF 出水 TP 浓度 0.245 mg/L,BF 对 TP 没有去除作用,在实验初期系统 1 进水 TP 浓度较高

($0.47 \sim 0.97 \text{ mg/L}$), BF 砂颗粒介质吸附大量磷, 待水网藻暴发后, 人工湖中 TP 迅速降低, 磷含量较低的湖水经过岸滤时, 携带出一部分磷, 使 BF 出水 TP 有所升高。系统 2 利用 GFH 去除人工湖进水中的 TP, 再生水通过 GFH 吸附柱时, 磷被吸附于 GFH 颗粒表面, 形成络合物^[9], 使 TP 从 0.285 mg/L 降至 0.029 mg/L (去除率 89.8%)。GFH 出水进入人工湖后, TP 浓度由于湖水蒸发浓缩升高到 0.109 mg/L ; 经 BF 系统砂颗粒多孔介质吸附, TP 降至 0.073 mg/L (TP 去除率 33.0%)。系统 2 采用 GFH 和 BF 两项保障措施, 对水中磷起到了很好的去除效果, 使人工湖 TP 维持在较低水平, 人工湖 TP 浓度比系统 1 低 43.4% 。系统 2 中 GFH 出水和 BF 出水 TP 浓度都很低, 保证了人工湖补水 TP 控制在较低水平, 后期人工湖 TP 浓度升高到 0.1 mg/L 以上, 一方面是夏季温度高、水分蒸发快; 另一方面是进水量小, 水体相对静止, 导致营养物质积累。

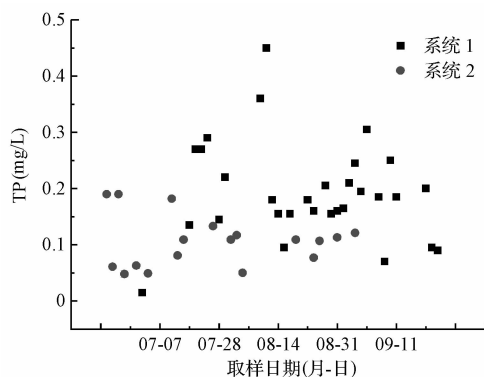


图3 2个系统人工湖内 TP 浓度比较

Fig.3 Comparison of TP concentration of artificial lake in two treatment systems

2.3 藻类生长特征

2 种不同水质保障系统维护下, 人工湖水质指标和优势藻类生长均出现不同现象。水网藻的适宜生长条件为: TN 浓度 $0.9 \sim 45 \text{ mg/L}$ 、N/P 在 $5 \sim 50$ 之间, 即使在 P 限制性水体中, 虽受到限制也能生长良好^[15]。系统 1 人工湖进水 TN 平均浓度 24.309 mg/L , TP 平均浓度 0.583 mg/L , N/P = 41, 适宜水网藻生长, 水网藻属于大型网状藻体, 主要集中于水深 30 cm 以上^[16], 通常用生物量 (干重) 来表征水网藻的生长情况, 实验进行 22 d 后开始出现水网藻, 生物量 2.41 g/m^2 , 29 d 后水网藻生物量达 11.85 g/m^2 , 之后进入稳定期, 水网藻对氮磷有较强

的净化能力, 水体透明度较高, 但是水网藻暴发时, 会布满湖面, 影响感官。系统 2 的 GFH 出水 TP 过低, 超出水网藻的耐受范围, 适宜在低磷状态下生长的蓝藻成为优势藻 (主要为铜绿微囊藻和小球藻), 湖水由绿色逐渐变为黄绿色, 透明度较低, 最后湖面出现一层蓝绿色的泡沫状悬浮物。蓝藻呈细小粉末状, 用生物量表征误差较大, 因而采用叶绿素-a 来表征其生长变化情况。实验期间叶绿素-a 最高达 141.058 mg/m^3 (图 4)。

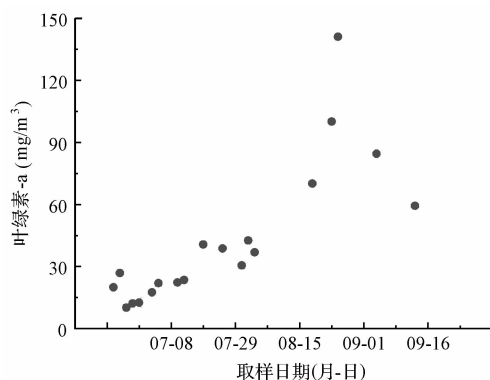


图4 系统 2 人工湖内叶绿素-a 浓度变化

Fig.4 Change of chl-a concentration of artificial lake in system two

3 结论

(1) 系统 1 进水流量大, 水力流动快, 氮磷含量偏高。系统 2 进水水质好 (NH_4^+-N 和 TP 较低), 进水量较小, 水力条件差, 后期 GFH、BF 出现堵塞, 致使营养盐积累, 水中出现蓝藻, 说明控制水体富营养化需从加强水力条件和控制进水氮磷等方面采取综合措施。

(2) 根据藻类自身的形态特征, 用生物量表征水网藻生长状况, 用叶绿素-a 表征蓝藻生长状况。系统 1 中人工湖进水的氮磷浓度较高, 且 N/P = 41, 适宜水网藻生长, 生物量高达 11.85 g/m^2 ; 系统 2 中人工湖进水为低磷水质 (TP < 0.05 mg/L), 适宜蓝藻 (主要是铜绿微囊藻和小球藻) 生长, 湖面出现蓝绿色泡沫状悬浮物 (蓝藻), 叶绿素-a 最高可达 141.058 mg/m^3 。

(3) 2 套系统中 BF 工艺对 NH_4^+-N 的去除都比较稳定, 分别为 30.5% 和 20.8% 。另外将 BF 出水补给人工湖, 加大了人工湖的水力循环, 对湖中污染物也具有稀释作用, 能够有效改善景观水体水质。

参考文献

- [1] 钱靖华, 田宁宁. 再生水回用于景观水体存在的问题及防治对策. 给水排水, **2006**, 32(5): 71-74
Qian Jinghua, Tian Ningning. The major problems and countermeasures for reclaimed water used for urban landscape waterbody. Water and Wastewater Engineering, **2006**, 32(5): 71-74 (in Chinese)
- [2] Furumai H. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. Phys. Chem. Earth, **2008**, 33(5): 340-346
- [3] 张杰, 熊必永, 李捷, 等. 污水深度处理与水资源的可持续利用等. 给水排水, **2003**, 29(6): 29-32
Zhang Jie, Xiong Biyong, Li Jie, et al. Advanced wastewater treatment and sustainable utilization of water resources. Water and Wastewater Engineering, **2003**, 29(6): 29-32 (in Chinese)
- [4] 李春丽, 周律, 贾海峰, 等. 再生水回用于景观水体的富营养化控制. 全国城市污水再生利用经验交流和技术研讨会. 天津, **2003**
- [5] 李娜, 杨建, 赵璇, 等. GFH 用于提高再生水回用景观水水质研究. 环境科学, **2010**, 31(10): 2354-2359
Li Na, Yang Jian, Zhao Xuan, et al. Application of GFH in the municipal effluent reuse for landscape. Environmental Science, **2010**, 31(10): 2354-2359 (in Chinese)
- [6] Genz A., Baumgarten B., Goernitz M., et al. NOM removal by adsorption onto granular ferric hydroxide: Equilibrium, kinetics, filter and regeneration studies. Water Res., **2008**, 42(1-2): 238-248
- [7] Driehaus W., Jekel M., Hildebrandt U. Granular ferric hydroxide—a new adsorbent for the removal of arsenic from natural water. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA., **1998**, 47(1): 30-35
- [8] Saha B., Bains R., Greenwood F. Physicochemical characterization of granular ferric hydroxide (GFH) for arsenic (V) sorption from water. Sep. Sci. Technol., **2005**, 40(14): 2909-2932
- [9] Persson P., Nilsson N., Sjöberg S. Structure and bonding of orthophosphate ions at the iron oxide-aqueous interface. J. Colloid Interface Sci., **1996**, 177(1): 263-275
- [10] Ray C., Grischek T., Schubert J., et al. A perspective of riverbank filtration. J. Am. Water Works Assoc., **2002**, 94(4): 149-162
- [11] Schubert J. Hydraulic aspects of riverbank filtration—field studies. Journal of Hydrology, **2002**, 266(3-4): 145-161
- [12] Hiscock K. M., Grischek T. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. Journal of Hydrology, **2002**, 266(3): 139-144
- [13] 王朝晖, 江天久, 杞桑, 等. 水网藻 (*Hydrodictyon reticulatum*) 对富营养化水样中氮磷去除能力的研究. 环境科学学报, **1999**, 19(4): 448-452
Wang Zhaohui, Jiang Tianjiu, Ji Sang, et al. Studies on nitrogen and phosphorus removal capacity of *Hydrodictyon reticulatum* in eutrophic freshwater samples. Acta Scientiae Circumstantiae, **1999**, 19(4): 448-452 (in Chinese)
- [14] 杨建, 李娜, 常江, 等. 再生水源景观水体水质保障的“GFH + BF”处理系统. 环境科学, **2011**, 32(5): 1377-1381
Yang Jian, Li Na, Chang Jiang, et al. Reclaimed water quality control for landscape with “GFH + BF” Treatment system. Environmental Science, **2011**, 32(5): 1377-1381 (in Chinese)
- [15] 林秋奇, 王朝晖, 杞桑, 等. 水网藻 (*Hydrodictyon reticulatum*) 治理水体富营养化的可行性研究. 生态学报, **2001**, 21(5): 814-819
Lin Qiuqi, Wang Zhaohui, Ji Sang, et al. Study on the feasibility of utilizing *Hydrodictyon reticulatum* to treat eutrophic waters. Acta Ecologica Sinica, **2001**, 21(5): 814-819 (in Chinese)
- [16] 李强, 王国祥, 马婷, 等. 水网藻附着对亚洲苦草光特性的影响. 湖泊科学, **2007**, 19(3): 315-320
Li Qiang, Wang Guoxiang, Ma Ting, et al. Changes of photosynthetic characters of *Vallisneria asiatica* adhered by *Hydrodictyon reticulatum*. Journal of Lake Sciences, **2007**, 19(3): 315-320 (in Chinese)