

底栖藻类对氮、磷去除效果研究

马沛明^{1,2}, 况琪军¹, 刘国祥¹, 胡征宇^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过模拟实验探讨了污水处理中底栖藻类的群落结构、生长状况及其对氮(N)、磷(P)的去除能力。实验期间, 被试藻类(丝状绿藻占优势)在污水中生长良好, 培养 5 d 后收获的藻类生物量可达 14.36 ± 0.72 g; 污水总氮(TN)、总磷(TP)含量分别由 36.97 ± 0.26 mg·L⁻¹、 2.88 ± 0.02 mg·L⁻¹ 降至 1.44 ± 0.09 mg·L⁻¹、 0.07 ± 0.01 mg·L⁻¹, 对氨氮(NH₄-N)和硝氮(NO₃-N)的去除率亦达 95% 以上; 藻体总凯氏氮(TKN)和 TP 含量分别为 $5.75 \pm 0.20\%$ 和 $1.5 \pm 0.22\%$ 。实验证明, 底栖藻类对污水中的 N、P 营养有明显的去除效果, 在污水的三级处理以及水体富营养化的防治方面具有较大的应用潜力。

关键词: 底栖藻类; 污水处理; 富营养化; N、P 去除

中图分类号: X17

文献标识码: A

文章编号: 1000-470X(2005)05-0465-05

Study on Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by Freshwater Benthic Algae

MA Pei-Ming^{1,2}, KUANG Qi-Jun¹, LIU Guo-Xiang¹, HU Zheng-Yu^{1*}

(1. Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper is aimed to discuss the removal ability on nitrogen and phosphorus from synthetic wastewater by freshwater benthic algae. A simulated test was conducted using the tested benthic algae collected from a discharge way of a paper mill wastewater in Wuhan. The results showed that the community structure of the benthic algae was mainly composed of filamentous green algal species with the most abundant alga of *Stigeoclonium* sp., which could grow well and showed a relatively high ability to removal nitrogen (N) and phosphorus (P) from synthetic wastewater. During a 5-days treatment, the concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in synthetic wastewater were changed from 36.97 ± 0.26 mg·L⁻¹ and 2.88 ± 0.02 mg·L⁻¹ to 1.44 ± 0.09 mg·L⁻¹ and 0.07 ± 0.01 mg·L⁻¹, respectively. The removal rates on TP, TN, ammonia-nitrogen (NH₄-N) and nitric-nitrogen (NO₃-N) were up to 96%, 98%, 98% and 97%, respectively. Simultaneity, algal biomass could be harvested to 14.36 ± 0.72 g. The contents of total Kelvin-nitrogen (TKN) and TP of harvested algal biomass were $5.75 \pm 0.20\%$ and $1.56 \pm 0.22\%$. It is implicated that freshwater benthic algal treatment system may have potential use in controlling lake eutrophication and be served as a means to restore lake ecosystem.

Key words: Benthic algae; Wastewater treatment; Eutrophication; Nitrogen and phosphorus removal

水污染和湖泊富营养化是一个越来越严峻的世界性环境问题之一。利用藻类大规模培养改善水质, 去除污水以及富营养化水体中的营养物质和有害金属已得到深入研究^[1,2]。Hoffmann 报道了高效藻类

塘中悬浮藻类和固定藻类单独或混合培养的污水处理技术^[3]。与悬浮藻类培养系统相比, 固定化藻类是通过物理或化学方法将藻类细胞固定在载体上, 形成固定化藻类系统应用于污水处理, 具有藻细胞浓

收稿日期: 2005-02-25, 修回日期: 2005-07-15。

基金项目: 国家 863 计划项目 (2002AA601021); 中国科学院知识创新工程重大项目 (KSCX2-1-10)。

作者简介: 马沛明 (1979—), 男, 硕士研究生, 主要从事污水生物处理方面的研究 (E-mail: minger_11@163.com)。

* 通讯作者 (E-mail: huzy@ihb.ac.cn)。

度高、反应速率快、运行稳定可靠、藻类细胞易于收获等优势。

应用底栖藻类净化污水的报道目前尚不多见。Vymazal 开拓性地开发了一种叫“bioeliminator”的底栖藻类处理系统用于自来水生产的预处理^[4], Craggs 等将底栖藻类用于城市三级废水处理^[5], Balley 和 Rectenwald 将生长在垂直塑料网上的底栖藻类饲养鱼类,最终通过捕鱼和收集鱼类的粪便去除湖水中的氮、磷^[6,7],均获得理想结果。总体来说,利用底栖藻类处理污水具有以下优势:设计较为简单,只要提供合适的基质和光照,控制特定的污水流速就能正常运行;底栖藻类固着在基质上,无需复杂的富集过程就能对藻类进行回收。

本实验以聚乙烯网作为基质,研究底栖藻类在基质上的生长状况及该系统对污水中氮、磷的去除效果,以期为污水的三级处理和水体富营养化的防治提供新的技术手段。

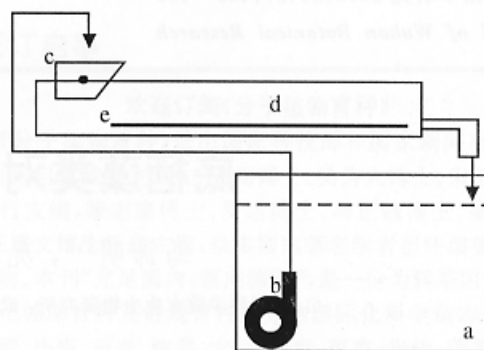
1 材料和方法

1.1 实验藻种的获得与培养条件

将长方形(120 cm×45 cm)的聚乙烯网固定于武汉某造纸厂排污口下游溪流的底部,10~15 d 后,将附着的藻类取回实验室,用清水洗净网上杂质,放置在培养槽中。培养面积为 0.54 m²,用 3×NBBM 培养基^[8]进行批量培养,周期为 7 d。经培养 1 个月,当聚乙烯网上底栖藻类的种类和生长量达到稳定状态时,循环通入 140 L 人工合成污水进行处理实验,周期为 5 d。实验露天进行,自然光照(实验期间天气晴好),日平均水温维持在 23℃左右,表层最大光强在正午达到 1700 μmol·m⁻²·s⁻¹;污水流速为 15 L·min⁻¹。为了减少污水中氨氮的挥发,适时加入盐酸抵消因光合作用导致的碱度降低,使污水 pH 维持在 7.0~7.5 之间。每批培养结束时用毛刷收集网上密集生长的藻类细胞。本实验先后做了 3 次,每次 2 个平行,各项测定指标均以 6 个数据的平均值进行结果分析。

1.2 实验装置

实验装置由 5 部分组成:污水桶、水泵、翻桶、处理池(120 cm×48 cm×18 cm)和作为底栖藻类生长载体的聚乙烯网(图 1)。污水由水泵导入翻桶,翻桶内水满后自动倾泻,形成波浪冲刷藻类,污水再次回流到污水桶,以此循环,处理池中水深 4~6 cm。



a. 污水桶(体积 200 L); b. 水泵; c. 翻桶; d. 处理池; e. 生长底栖藻类的聚乙烯网(面积 0.54 m²)
a. Plastic drum(200 L volume); b. Pump; c. Tipping bucket; d. Treatment system; e. Polyethylene screen to support algal growth(0.54 m²)

图 1 底栖藻类培养装置示意图

Fig. 1 Schematic of setup that used to grow benthic algae

1.3 合成污水的组分与水质特征

实验污水系人工配制的合成污水,其组份为:尿素 0.075 g, (NH₄)₂SO₄ 0.037 5 g, Ca (HPO₄)₂ 0.015 g, MgSO₄·7H₂O 0.012 5 g, NaHCO₃ 0.15 g, FeCl₃(1%) 0.075 mL, 自来水 1 000 mL;水质特征为:TN 25~30 mg/L, NH₄-N 6~10 mg/L, TP 2~4 mg/L, Mg 1~3 mg/L, Ca 1.0 mg/L; pH 值 7.4~7.7。对藻类所提供的几乎全为可溶性营养物质,污水中可溶性磷酸盐(PO₄-P)浓度和 TP 浓度基本一致。由于合成污水是用自来水配制,自来水本身的洁净状况不如蒸馏水,故实验中合成污水的营养浓度可能比设计值要高。

1.4 测定项目与分析方法

实验期间每天测定污水的 TN、TP、NH₄-N 和 NO₃-N 的含量,按水与废水分析的标准方法^[9]进行,取平均值。藻类生物量测定方法为:聚乙烯网按面积分成三等份,用毛刷刷取网上密集的藻类,收获的藻类在 105℃ 先烘 15 min,随后将温度降至 65℃ 再烘 5~6 h 至恒重,两次称重之差≤0.002 g,取平均值换算成藻类生物量。收获藻类的 TKN 和 TP 委托湖北省饲料质量监督检测站测定。藻类对 N、P 的去除率(R)按下式计算:

$$R_n = (C_0 - C_n) / C_0 \quad (1)$$

式中 R_n 为第 n 天时藻类对营养物质的去除率;C₀ 为营养物质的初始浓度(单位 mg·L⁻¹);C_n 为第 n 天营养物质的浓度(单位 mg·L⁻¹)。

1.5 数据的统计分析

采用 ORIGIN Version 6.1 软件进行数据分析。

2 结果

2.1 藻类的种类组成及生长状况

显微镜下观察发现,藻类在聚乙烯网上的分布分为里层和外层。丝状绿藻主要分布在外层,优势种包括:毛枝藻(*Stigeoclonium* sp.),鞘藻(*Oedogonium* sp.)以及丝藻(*Ulothrix* sp.)等;其中毛枝藻的生物量最大,鞘藻次之,丝藻较少。分布在外层的藻类还有少量蓝藻中的颤藻(*Oscillatoria* sp.)和席藻(*Phormidium* sp.)。分布在里层、被丝状绿藻所覆盖的藻类主要是硅藻门的舟形藻(*Navicula* sp.),其生物量相对较小。

伴随底栖藻类在聚乙烯网上生长的生物还有浮游动物,最常见的是轮虫,其次还有少量底栖动物。水流的冲刷以及对藻类定期收获可有效限制轮虫的生物量,实验中轮虫对藻类的牧食能力较小,对藻类生物量的影响不大。实验的2个月期间,藻类的种类组成极为稳定。

污水处理系统中底栖藻类始终生长良好,在实验的第3 d,聚乙烯网表面的藻体色泽鲜绿、在水流中自然伸展、藻丝清晰可见,长2~3 cm;第5 d时,网上铺满丝状绿藻,强烈的光合放氧作用使藻体间充满气泡而显得蓬松,但有部分藻丝因过长而被水流冲断。为了防止断裂的藻体流入水中造成二次污染,此时即对藻类进行适当收获。

对培养1~5 d的底栖藻类进行收获并测定其生物量得知,底栖藻类的生长分为:生长缓慢、生长迅速、再次变得缓慢三个阶段,其生长曲线呈正S形。实验中藻类的生物量主要取决于丝状绿藻,所以可以近似认为藻类的生长符合单一种群的增长模式——logistic方程,即:

$$N_t = K / (1 + 64.19e^{-rt}) \quad (2)$$

式中 N_t 为生物量; K 为环境容纳量; r 为增长率; t 为培养时间。用本实验中藻类生长量(干重)与培养时间拟合得: $r = 1.210$, $K = 16.22$ g, 故式(2)可简化为:

$$N_t = 16.22 / (1 + 64.19e^{-1.210t}) \quad (3)$$

式(3)的相关系数(R^2)为0.983,即: $R^2 = 0.983$ 。

2.2 底栖藻类对营养物质的去除

人工污水中的TN、TP浓度均随培养时间的延长而逐渐下降,浓度与培养时间之间的相关性曲线为反S型,与藻类生物量的增长明显呈反相关性。

在培养的前3 d,污水中的氮磷比稳定在12~14之间,第4 d比值开始急剧上升,达27,第5 d后又迅速下降,虽然变化剧烈,但氮磷之比皆维持在

20以上(图2)。

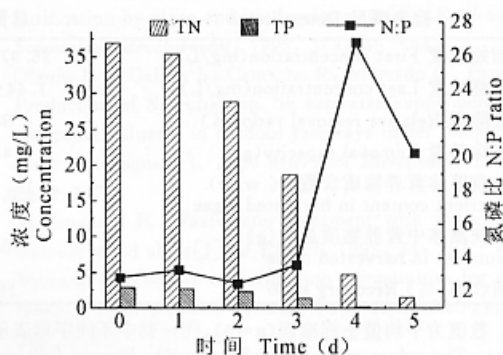


图2 培养期间氮磷比的变化

Fig. 2 Changes of N:P ratios in the time course

明显可见,TN和TP去除率的变化趋势基本一致,在培养的第3 d显著上升,第4 d达到80%以上,随后变化趋于平缓。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率的变化差异较大, $\text{NH}_4\text{-N}$ 仅在第2 d就有明显的升高,第3 d已经达到80%以上; $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率在前3 d没有明显变化,不足10%,直到第4 d、第5 d去除率迅速上升(图3)。

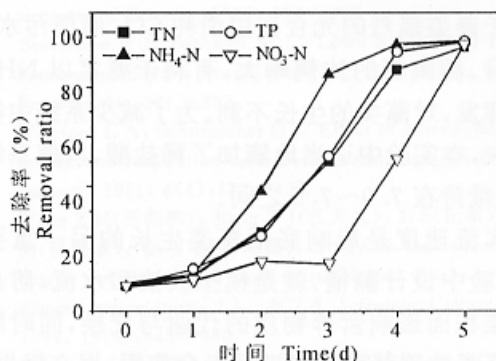


图3 底栖藻类对各种营养的去除效果

Fig. 3 Removal rate of nutrients by benthic algae

在5 d的处理期间,底栖藻类对污水TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率分别达到96%、98%、98%和97%,对实验数据进行配对数据的 t 检验,结果表明:4种营养物质的初始和最终浓度存在显著性差异($P < 0.05$)。TN、TP含量分别由 $36.97 \pm 0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.88 \pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $1.44 \pm 0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.07 \pm 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,藻类对N、P的吸收速率分别达到 $1.84 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。收获藻体的TKN、TP含量分别为5.75%和1.56%,可估算收获藻体的粗蛋白含量为35.96%。藻类对污水N、P的回收率分别为16.70%和56.41%(表1)。

表 1 藻类对污水营养物质的去除率和回收率
Table 1 Removal rate and recovery rate of nitrogen and phosphorus by benthic algae

检测项目 Detect items	总氮 TN	总磷 TP	氨氮 NH ₄ -N	硝氮 NO ₃ -N
初始浓度 First concentration(mg/L)	36.97±1.44 ^a	2.88±0.45 ^a	7.02±0.29 ^a	1.69±0.19 ^a
最终浓度 Last concentration(mg/L)	1.44±0.26 ^b	0.07±0.02 ^b	0.14±0.02 ^b	0.05±0.01 ^b
去除率 Relative removal ratio(%)	96%	98%	98%	97%
去除总量 Removal capacity(g)	4.97	0.39	0.96	0.23
收获藻体营养物质含量(% w/w) Nutrient content in harvested algae	5.75±0.20 (TKN)	1.56±0.22	—	—
收获藻体中营养物质总量(g) Nutrient in harvested algae	0.83	0.22	—	—
回收率(%) Recovery ratio	16.70	56.41	—	—

注：数值为平均值±标准误(n=6)，同一列中不同字母表示差异显著(P<0.05)。
Note: The values are means±SE (n=6). Figures followed by the same letter in the same column are not different to the significance level of P<0.05.

3 讨论

3.1 污水处理系统的运行情况

实验中发现,处理系统的 pH 值对底栖藻类的生长和氮磷营养物质的去除有较大影响,主要与氨态氮存在的形式有关。当 pH 值为 7 左右时,氨氮多以铵离子形式存在,有利于藻类的吸收和利用,而当 pH 值为 9 时,污水中 40% 的氨氮以 NH₃ 形态挥发, pH 值为 10 时,80% 的氨氮以 NH₃ 形态挥发^[7]。白天由于藻类强烈的光合作用消耗 CO₂ 而使污水 pH 值上升,游离氨的比例增大,有利于氨氮以 NH₃ 的形态挥发,对藻类的生长不利。为了减少系统中氨氮的流失,本实验中适当地滴加了稀盐酸,以使系统的 pH 值维持在 7.0~7.5 之间。

水流速度是影响底栖藻类生长的另一重要因素,实验中设计翻桶,就是模拟波浪和水流,防止因藻类堆积而影响营养物质的代谢与交换,同时防止内层藻类被遮蔽而不能进行光合作用。据文献报道,在大多数水生境中,适中的水流速度能使藻类生物量达到最高^[10]。Whitford 早在 1961 年就发现,水流在剪切速度为 18 cm·s⁻¹ 时,鞘藻将以 10 倍于静水中的速率吸收水体中的 P,并有更高的呼吸速率^[11]。一般来说,在相同的营养物质浓度和光照条件下,浮游藻类在耗尽周围水体的营养物质时,由于水体交换缓慢,生长和繁殖很快受到限制,而生长在高流速水体的底栖藻类则不会受此限制。

3.2 处理系统中底栖藻类生物量的变化

实验的第 2 d,藻类生物量(干重)为 1.7±0.68 g;第 3 d 生物量达到 6.93±2.35 g,生长率达到最大值;第 5 d 时藻类生物量为 14.36±0.72 g,与环境容纳量 16.22 g 基本接近,说明在藻类生长速率减缓并逐渐降低时对藻类进行收获,较为适宜。

王朝晖等^[12]在水网藻处理富营养化及重富营养化湖水的研究中指出,水网藻的生长在接种后的第 4 d 达到最大值,而后迅速降低,并不象单细胞浮游藻类在达到最大生长率后会出现一个相对稳定的生长平稳期。在本实验中,系统中底栖藻类(丝状绿藻占优)的生长速率在第 5 d 后开始下降,进一步证明,底栖藻类的生长模式不同于单细胞浮游藻类。

人工污水中 TN、TP 浓度随培养时间的变化呈反 S 型曲线,与藻类生长的正 S 型曲线明显负相关性,说明藻类生长过程中大量吸收水体中的氮磷营养物质经历了从慢到快和从快到慢两个阶段,完全符合藻类生物量增长、污水中营养物质减少的常规规律。

水体中的氮磷比例对藻类的生长至关重要,本实验中,实验的前 3 d,尽管污水的 TN、TP 迅速下降,但浓度依然很高,远超过富营养化水体的水平,氮磷比也相对稳定,维持在 12~14 之间,适合藻类生长。

3.3 底栖藻类对氮、磷的去除效果

实验的前 2 d,NH₄-N 浓度迅速降低,到第 3 d,去除率达到 80% 以上(图 3)。与此同时,NO₃-N 浓度只有微弱起伏,第 3 d 的去除率不足 10%;第 3 d 以后,藻类对 NH₄-N 的去除变得缓慢,NO₃-N 浓度则迅速降低。与作者先期报道^[13]的水网藻、刚毛藻、水绵三种大型绿藻优先利用 NH₄-N 的结果基本一致。王朝晖等^[12]则发现,在 N 负荷较高的时候,藻类对 NO₃-N 的去除率相对较小,而且在处理过程中还略有回升。有关藻类去除氮的过程和机理早有报道^[14],藻类能优先利用污水中的 NH₄-N 和其它还原态氮,是由于藻类不产生有活性的硝酸还原酶,只有当污水中 NH₄-N 的浓度很低或消耗殆尽时才对 NO₃-N 进行吸收和利用。可以推测,降低系统中 N

的负荷或者延长处理时间,可望减少 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的积累,并有利于藻类对其的吸收。

底栖藻类处理系统对人工合成污水有很强的净化效果,5 d 内对污水 TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率均达 95% 以上。TN、TP 含量分别由 $36.97 \pm 0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.88 \pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $1.44 \pm 0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.07 \pm 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而悬浮培养的小球藻在一级、二级污水处理系统中,第 7 d 对 N、P 的去除率为 70%,污水中的总无机 N 含量从 $37.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对总无机 P 的去除率仅 50%^[15]。

本实验中藻类对污水 TN、TP 回收率分别为 16.70% 和 56.41%,这说明藻类并不是仅仅通过吸收和转化的过程来去除水体氮磷。Kebede-Westhead 利用底栖藻类净化不同 N、P 含量畜牧废液,藻类对废液 TN、TP 的回收率分别波动在 31%~52% 和 30%~59% 范围内^[16]。Craggs 曾报道底栖藻类去除氮磷主要途径有两条:一是通过藻类的吸收并转化为藻体自身物质;其次通过藻类的生长改变污水理化条件去除氮磷:N 以氨氮的形式挥发,P 以不溶状态沉淀、析出^[17]。

Hindak 和 Pribil 指出某些底栖藻类在生物量和蛋白生产方面比浮游藻类更有优势^[18]。本实验中收获藻体的粗蛋白含量为 35.96%,可以作为很好的蛋白来源。收获的藻类生物量具有几种潜在的利用价值:饲料添加剂、肥料、燃料(沼气)。

以上结果说明底栖藻类处理系统作为一种新型生态工程手段用于污水三级处理或富营养化水体的治理具有潜在的应用前景。

4 结论

(1) 本实验条件下,批量培养的底栖藻类对人工合成污水具有很强的净化效果,5 d 内对污水中的 TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率均可达 95% 以上。(2) 人工基质上生长的底栖藻类主要由丝状绿藻组成,且在整个实验期间能保持较好的稳定性和连续性。(3) 底栖藻类在污水中生长迅速,当藻类收获后,基质上的残留藻细胞可重新大量繁殖,并再用于污水处理,由此“培养—收获—培养”的循环运转方式,可有效节省成本。

参考文献:

- [1] Yan G A(严国安), Tan Z Q(谭智群). Study on the sewage purification by algae and its development[J]. *Environmental Science and development*, 1995, 3(3): 45-54.
- [2] Olguin E J, Galicia S, Camacho R, Mercado G, Perez T J. Production of *Spirulina* sp. in seawater supplemented with anaerobic effluents in outdoor raceways under temperate climatic conditions[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1997, 48: 242-247.
- [3] Hoffmann J P. Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae[J]. *J Phycol*, 1998, 34: 757-763.
- [4] Vymazal J. The use of periphyton communities for nutrient removal from polluted streams [J]. *Hydrobiology*, 1988, 166(3): 225-237.
- [5] Craggs R J, Adey W H, Jensen K R, St. John M S, Green F B, Oswald W J. Phosphorus removal from wastewater using an algal turf scrubber[J]. *Water Sci Technol*, 1996, 33(7): 191-198.
- [6] Rectenwald L, Drenner R W. Nutrient removal from wastewater effluent using an ecological water treatment system [J]. *Environ Sci Technol*, 2000, 34(3): 522-526.
- [7] Bailey F G. Advanced Integrated Waste-water Pond systems for nitrogen removal[J]. *Water Sci Technol*, 1996, 33(7): 207-217.
- [8] Hua Y C(华汝成). Culture and Utilization of Single Cells Algae [M]. Beijing: Publishing House of Agriculture, 1986. 279-281.
- [9] Wei F S(魏复盛). Guide of Analysis Methods for Water and Wastewater [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Environmental Science, 1998. 252-286.
- [10] Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L. Algal Ecology-Freshwater Benthic Ecosystems [M]. San Diego: Academic Press, 1996. 321-322.
- [11] Whitford L A, Schumacher G J. Effect of current on mineral uptake and respiration by a fresh-water alga[J]. *Limnol Oceanogr*, 1961, 6(4): 423-425.
- [12] Wang Z H(王朝晖), Jiang T J(江天久), Ji S(纪桑), Luo Y M(骆育敏), Qi Y Z(齐雨藻). Study on the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophicated waters by *Hydrodictyon reticulatum* [J]. *ACTA Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(4): 448-452.
- [13] Kuang Q J(况琪军), Ma P M(马沛明), Liu G X(刘国祥), Bi Y H(毕永红), Hu Z Y(胡征宇). Study on the removal efficiency of nitrogen and phosphorus by filamentous green algae [J]. *ACTA Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), 2004, 28(3): 323-326.
- [14] Syrett P J. Nitrogen metabolism of microalgae [J]. *Can Bull Fish Aquat Sci*, 1981, 210: 182-210.
- [15] Tam N F Y. Algal growth and nutrient removal in Hong Kong domestic wastewater[J]. *Environ Pollut*, 1989, 58: 19-34.
- [16] Kebede-Westhead E, Pizarro C, Mulbry W W, Wilkie A C. Production and nutrient removal by periphyton grown under different loading rates of anaerobically digested flushed dairy manure[J]. *J Appl Phycol*, 2003, 39(6): 1275-1282.
- [17] Craggs R J. Wastewater treatment by algal turf scrubbing [J]. *Water Sci Technol*, 2001, 44(11): 427-433.
- [18] Hindak F, Pribil S. Chemical composition, protein digestibility and heat of combustion of filamentous green algae[J]. *Bi-ol Plant* (Prague), 1968, 10(3): 234-244.