

# 水网藻 (*Hydrodictyon reticulatum*) 治理水体富营养化的可行性研究

林秋奇, 王朝晖, 杞 桑, 韩博平

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

**摘要:** 研究了不同形态的氮及磷浓度对水网藻的生长及吸收去除氮磷能力的影响; 并对水网藻在我国南方供水水库 GDAR 现场的生长能力作出评价。水网藻在氮磷比为 15 左右的条件下, 生长及氮、磷去除能力均为最好, 并能优先吸收氨氮。在总氮、总磷分别为 4.5mg/L 和 0.3mg/L 时, 对总氮和总磷的 3d 去除率几乎达 100%。水网藻在水库现场全年均能正常生长。夏、秋和冬 3 个季度的生长率分别为 1.051、0.557 和 0.353。实验证明水网藻可以作为改善我国南方富营养化水库水质的一种辅助措施。

**关键词:** 水网藻; 生长; 富营养化; 氮; 磷; 去除

## Study on the feasibility of utilizing *Hydrodictyon reticulatum* to treat eutrophic waters

LIN Qiu-Qi, WANG Zhao-Hui, QI Sang, HAN Bo-Ping (Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** The absorption of nitrogen (N) and phosphorus (P) by *Hydrodictyon reticulatum* was studied under laboratory conditions, and field studies were carried out simultaneously in a eutrophic reservoir in south China to assess its growth ability. Results showed that the optimal N:P ratio was 15 for its growth. *Hydrodictyon reticulatum* absorbed phosphorus very rapidly, and almost removed phosphorus off thoroughly at various N:P ratios after growing three days. Removal rates of TN were all above 74% at various N:P ratios and almost up to 100% when TN and TP concentrations were 4.5mg/L and 0.3mg/L respectively. It was found that the algae assimilated ammonium preferentially when ammonium and nitrate were simultaneously used as nitrogen sources. *Hydrodictyon reticulatum* grew well in the reservoir and its growth rates were 1.051, 0.557 and 0.333 in summer, autumn and winter, respectively.

**Key words:** *Hydrodictyon reticulatum*; growth; eutrophication; nitrogen; phosphorus removal

文章编号: 1000-0933(2001)05-0814-06 中图分类号: Q149, Q178 文献标识码: A

治理水体富营养化有多种途径, 其中利用水生植物净化富营养化水体是重要途径之一。水网藻 (*Hydrodictyon reticulatum*) 系大型网袋状绿藻, 广泛分布于池塘沟渠等静水或水流缓慢的水体中。水网藻生长速度快, 生长温度范围广 (5~40℃)<sup>[1]</sup>, 藻体含氮量比较高 (5%左右)<sup>[1,2]</sup>, 氮磷吸收能力强, 易于收集, 因此, 利用水网藻治理富营养化水体有很大的潜力<sup>[2~4]</sup>。富营养化的水体通常含有大量的氨态氮, 散发出难闻的气味, 因此对氨态氮的去除能力是评价藻类治理水体富营养化能力的重要指标。同时, 淡水水体中磷的含量一般处于缺乏状态, 为磷限制性水体<sup>[5]</sup>, 磷的缺乏能直接影响藻类的生长及其对氮磷等营养物的吸收去除能力。本文作者在前期研究中, 只是在实验室条件下就环境条件对水网藻生长及氮磷吸收能力的影响作了一些研究<sup>[2~4]</sup>, 对上述问题及水网藻在富营养化水体现场的生长能力尚未作出进一步的探索。因此, 在

基金项目: 留学回国人员基金 ([1999]363 号) 和广东省自然科学基金 (984167) 资助项目

收稿日期: 2000-09-15 修回日期: 2000-11-15

作者简介: 林秋奇 (1973~), 男, 广东潮阳人, 硕士, 助教。主要从事水域生态学研究。

前期研究的基础上,结合我国南方供水水库 GDAR 的富营养化治理问题,模拟该水库常年营养的一般水平,探讨氮磷比及不同形态的氮对水网藻生长及其对氮(尤其是氨态氮)、磷吸收能力的影响,对水网藻在该水库中的常年生长能力作出评价,为水网藻治理我国南方水体的富营养化提供可行性依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 藻种及培养条件

水网藻采自广州市东郊菜地沟渠中,经分离纯化进行单种培养。实验前,将几个成熟的集结体移至新鲜培养基中,4~8d 后可繁殖出小集结体。小集结体生长 3~4d 后,即用作试验材料。

实验室培养条件:温度为  $25 \pm 1$  C,光强为  $4000 \pm 500$ lx,光暗比为 12:12。试验用培养基以 BBM 培养基为基础<sup>[6]</sup>,其中氮、磷源按试验要求进行调整。

### 1.2 培养容器及接种量

实验室实验在 500ml 三角瓶中进行,每瓶装 250ml 培养液,投放藻量为 300mg(鲜重)。水库现场试验在用 25 目筛绢制成的小型网袋(长、宽约为 20cm 左右)中进行,每个网袋投入藻量为 1g(鲜重)。试验均设 3 个平行。

### 1.3 氮、磷对水网藻的生长效应及被去除效果

**1.3.1 水网藻在不同氮磷比下的生长** 本试验以氮为基准,设计了 4 种总氮(硝态氮)浓度:0.9、4.5、15 和 45mg/L,氮磷比分别为:5、10、15、30 和 50。试验进行 6d,每隔 2d 换 1 次培养基,第 6 天称水网藻鲜重,并按下式计算生长速率<sup>[7]</sup>: $R = (\ln F_t / F_0) / (t \ln 2)$ ,其中  $R$  为水网藻生长率, $F_t$  为  $t$ d 的生物量, $F_0$  为起始生物量, $t$  为试验时间。

**1.3.2 水网藻在不同氮磷比条件下对总氮、总磷的吸收能力** 为了评价水网藻在不同氮磷比下对总氮、总磷的去除能力,实验仍以氮为基准,在氮为 4.5mg/L(其中硝态氮为 1.5mg/L,氨态氮为 3.0mg/L)下,设计了 5、10、15、30 和 50 等 5 个氮磷比。实验共进行 3d,每天测定水样的总氮和总磷含量<sup>[8]</sup>。

**1.3.3 不同比例的硝氮、氨氮下水网藻对各形态氮的吸收过程** 氨态氮是引起水库富营养化的主要原因之一,水网藻对氮,尤其对氨态氮的吸收能力如何,对水网藻能否作为一种治理富营养化水体的优良藻种至关重要。基于此目的,实验参考我国南方供水水库 GDAR1997 年硝氮和氨氮的监测结果,总氮设为 4.5mg/L,总磷为 0.3mg/L;氨氮分别为:0、1.5、2.25、3 和 4.5mg/L,硝氮则相应为:4.5、3、2.25、1.5 和 0mg/L。pH 值为 7.5。由于水网藻吸收氮,磷甚快,故实验只进行 3d,每天测定培养基的硝态氮、氨态氮、总氮和总磷含量<sup>[8]</sup>。

### 1.4 水网藻在我国南方供水水库 GDAR 现场生长能力

为评价水网藻各季度在我国南方供水水库 GDAR 现场的生长能力,于 1997 年夏季 7 月 15 日至 25 日、秋季 11 月 5 日至 15 日和 1998 年冬季 1 月 6 日至 17 日,进行了 3 次现场试验。每次试验均进行 12d 左右,试验期间,隔日称一次水网藻鲜重,并于上午 10:00 点测定水体表层温度和光照强度(水面下 10cm 左右)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同氮磷比对水网藻生长影响试验

水网藻在各总氮浓度及氮磷比的生长率见图 1。由图 1 可见,水网藻在总氮 0.9~45mg/L,氮磷比 5~50 的范围中均能生长,且长势良好;在同一氮磷比下,水网藻生长速率随总氮浓度的升高而增加;在各总氮浓度中,水网藻均在氮磷比为 15 左右时,生长最好。

水体的富营养化主要由过量的氮、磷输入引起的,但氮磷浓度的比例与藻类的生长有密切关系。一般来说,淡水水体属于磷抑制性水体<sup>[4]</sup>。本文作者利用水网藻进行 AGP 试验(藻类增长潜力试验),发现该试验阶段所取的水库水样属于磷抑制型<sup>[3]</sup>。Rhee 认为氮、磷不可能同时抑制藻类的生长,每种藻类均有最佳生长氮磷比,当环境中氮磷比低于最佳值时,生长受氮抑制;相反,则受磷抑制<sup>[9]</sup>。从本实验结果看,水网藻生长最佳氮磷比在 15 左右,而同时由图 2 可知,水库库区内 1997 年全年氮磷之比一般在 20~35 左右,最高时可达 50,也就是说,该水库全年大部分时间为磷抑制型。因而治理该水库的主要目的是去除过量的氮

(水库总氮含量最高时可达 5.32mg/L,图 2)。虽然水库属于磷抑制型,但从实验结果看,水网藻在氮磷比为 5~50 范围内均能生长,且长势良好,表明水网藻能在该水库中正常生长。

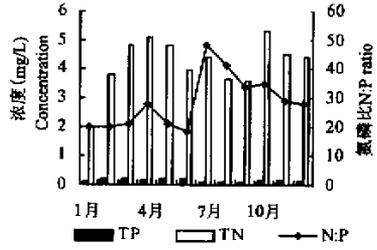
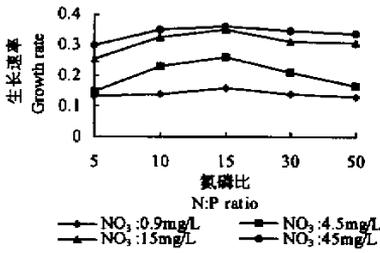


图 1 水网藻在不同总氮浓度及氮磷比下的生长

图 2 水库库区内 1997 年各月份总氮,总磷含量及氮磷比

Fig. 1 Growth rates of *H. reticulatum* at various N:P ratios

Fig. 2 N:P ratios and concentrations of N and P in the reservoir in 1997

藻类去除水体中氮、磷的能力,主要由藻类本身的生长潜力及氮磷含量所决定。从实验结果看,水网藻在总氮 0.9~45mg/L 中均能正常生长,表明水网藻对氮具有很高的耐受力。而在低氮条件下如何呢? Hawes 的研究表明:周围环境总氮总磷浓度只需分别高于 0.02 和 0.005mg/L 时,水网藻就能正常生长,并且在与其它藻类的营养竞争中占据优势<sup>[1]</sup>。

2.2 不同氮磷比条件下水网藻对总氮、总磷的吸收能力

图 3、4 和表 1 为水网藻在各氮磷比下对总氮,总磷去除率及去除量与时间关系。从图 3 可见,当培养基氮磷比低于 15 时,水网藻对总氮 3d 去除率均高达 95% 左右;但当氮磷比高于 15 时,对总氮 3d 去除率则随氮磷比的升高而降低。由表 1 可知,水网藻第 1 天的总氮去除量在氮磷比为 15 时最高,与生长情况基本相同。图 4 和表 1 表明,水网藻在高氮磷比下对总磷的去除速率比总氮相对要快,对总磷 3d 去除率几乎达 100%;但从整个去除过程看,水网藻对总磷的去除量随着氮磷比的升高而降低,而去除率则随氮磷比的升高而升高。

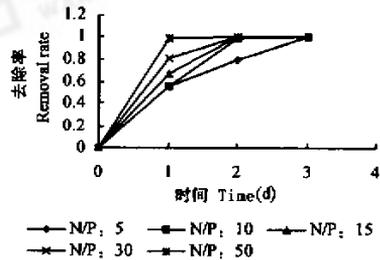
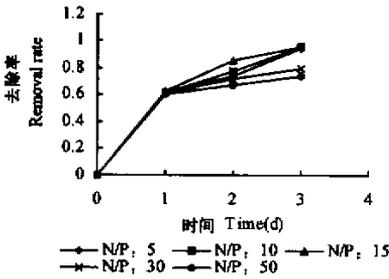


图 3 水网藻在各氮磷比下对总氮去除率

图 4 水网藻在各氮磷比下对总磷去除率

Fig. 3 The ability of *H. reticulatum* to remove TN at various N:P ratios

Fig. 4 The ability of *H. reticulatum* to remove TPat various N:P ratios

Hawes 等人的研究发现新西兰株水网藻生长率与细胞组织中氮的含量呈线性关系;与磷的含量则呈双曲线关系。这表明新西兰株水网藻细胞能过量地吸收磷,并贮存起来<sup>[1]</sup>。因此,从本实验的结果看,水网藻由于具有过量吸收并贮存磷的能力,所以对磷的吸收量随着氮磷比的降低而增加;对总氮第 1 天的摄取量则与生长率呈正相关关系,生长快,细胞氮含量高,氮的吸收量也随之增多。在高氮磷比(大于 15)下,磷

的缺乏使水网藻细胞组织中磷的含量降低,而细胞组织中氮的含量也相应降低,造成了生长率下降。因此,在同一总氮浓度下,水网藻在氮磷比为 15 左右时,对总氮的去除率比较高。黄玉瑶等人的研究也表明,如调控污水的氮磷比,污水中藻类产量及污水净化效果均达最佳状态<sup>[10]</sup>。

表 1 不同氮磷比下第 1 天残留、去除氮、磷量(mg/L)

Table 1 The residue and removal of N and P at various

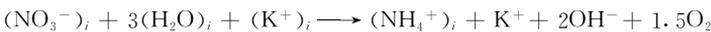
N:P ratios after growing one day

| 氮磷比        | N:P ratios after growing one day |       |      |       |       |
|------------|----------------------------------|-------|------|-------|-------|
| N:P ratios | 5                                | 10    | 15   | 30    | 50    |
| 残留量        | TN 1.72                          | 1.70  | 1.64 | 1.75  | 1.81  |
| Residue    | TP 0.40                          | 0.21  | 0.10 | 0.028 | 0.004 |
|            | N/P 4.30                         | 8.09  | 16.4 | 62.5  | 452.5 |
|            | TN 2.78                          | 2.80  | 2.86 | 2.75  | 2.69  |
| 去除量        | TP 0.50                          | 0.24  | 0.20 | 0.122 | 0.086 |
| Removal    | N/P 5.56                         | 11.67 | 14.3 | 22.54 | 31.27 |

由于水网藻有强烈地吸收、贮存磷的能力,即使在:水体中的氮磷比不适合藻类生长(通常为磷限制状态):时,水网藻仍能维持比较好的长势,并对氮、磷有较强的去除能力,从而抑制其它浮游藻类的生长,防止水华的发生。

2.3 不同比例的氨态氮、硝态氮下水网藻对氮磷的吸收过程从图 5 可见,当培养基含有氨态氮时,在培养的第 1 天,各氨态氮硝态氮混合比中的水网藻均首先吸收利用氨态氮,硝态氮则几乎没有吸收,随着氨态氮被吸收利用完之后,才开始利用硝态氮;而对总氮总磷 3d 去除率在不同比例下变化不大,均几乎达 100%。

氨态氮和硝态氮是藻类生长的两种主要氮源。Stary<sup>[11]</sup>等人研究发现,水网藻不能直接利用硝态氮,硝态氮进入细胞后,需被还原成氨态氮后才能被利用,这个过程至少需 4 个步骤,总的反应可以表达如下:



其中  $i$  表示细胞内部;而氨氮进入细胞后,可直接被利用。由此可见,在氨态氮和硝态氮两者同时存在时,水网藻优先同化氨态氮,氨态氮被吸收完后,才开始利用硝态氮。富营养化水体中氨态氮含量一般比较高,是水体富营养的一个主要指标之一,而水网藻能优先吸收利用氨态氮,表明利用水网藻治理水体的富营养化是可行的。

#### 2.4 水网藻在水库现场生长曲线

图 6 为水网藻在夏季的 Logistic 生长曲线。从图中可看出,水网藻在前 4d 的生长速度明显比后几天缓慢,这与当时的天气条件有很大的关系。表 2 为当时的水温、光强及生物量数据。由表 2 可知,实验期间水温一直维持在 30℃ 左右,水体表层光强为 5000~10000lx,

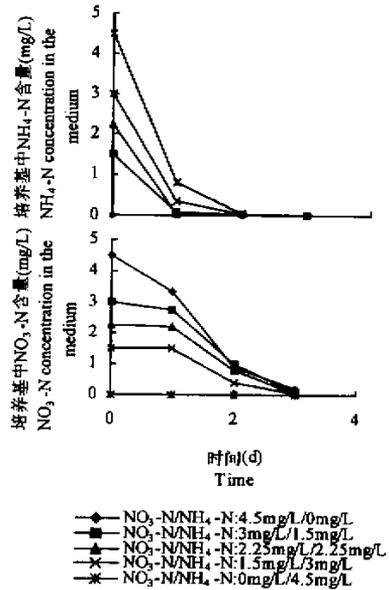


图 5 培养基中氨氮和硝氮在不同混合比下的含量随生长时间的变化

Fig. 5 The concentrations of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  in the medium at various ratios of  $\text{NH}_4\text{-N}$  to  $\text{NO}_3\text{-N}$  with time

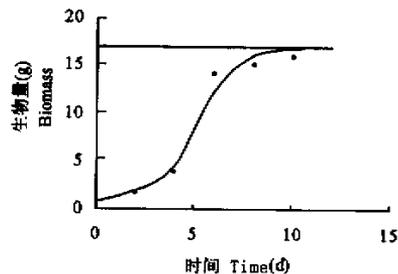


图 6 1997 年 7 月份水网藻于水库现场生长曲线

Fig. 6 The growth curve of *H. reticulatum* in the reservoir in July 1997

都相对比较稳定,但前 4d 一直在下大雨,而后几天则天气晴朗。因下雨的天气对水网藻的生长影响很大,造成前几天的生长相对比较缓慢。模拟 Logistic 方程时,因生长率  $r$  不同,在时间上需分段进行。经模拟得生长率  $r$  分别为 0.457 和 1.051,方程如下:

$$N_t = 17 / (1 + 20.25e^{-0.457t}), \tag{1}$$

$$N_t = 17 / (1 + 20.25e^{-1.051(t-4)}) \quad R^2 = 0.976 \tag{2}$$

其中方程(1)适用于实验的前 4d,方程(2)则用于后半段时间, $t$  为时间, $N_t$  为  $t$  时间水网藻生物量。

表 2 1997 年 7 月份天气条件

Table 2 Environmental conditions in July 1997

| 项目<br>Item                   | 日期 Date |      |      |      |      |       |
|------------------------------|---------|------|------|------|------|-------|
|                              | 15/7    | 17/7 | 19/7 | 21/7 | 23/7 | 25/7  |
| 水温 <sup>①</sup> (C)          | 31      | 29   | 28   | 29   | 30   | 30    |
| 表层光照<br>强度 <sup>②</sup> (lx) | 6000    | 5000 | 4000 | 6000 | 6500 | 10000 |
| 天气 <sup>③</sup>              | 阵雨      | 大雨   | 大雨   | 晴    | 晴    | 晴     |

① Surface temperature, ② Surface light intensity, ③ Weather

其方程:

$$N_t = 17 / (1 + 20.25e^{-0.353t}) \quad R^2 = 0.983 \tag{4}$$

由方程(1)到(4)可知,这几次实验的环境容纳量均为 17g/网袋。水网藻在夏季生长最快,在冬季则相对最慢,但生长率仍达 0.353。

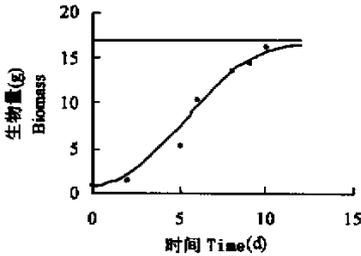


图 7 1997 年 11 月份水网藻水库现场生长曲线

Fig. 7 The growth curve of *H. reticulatum* in the reservoir in November 1997

表 3 1997 年 11 月份天气条件

Table 3 Environmental conditions in November 1997

| 项目<br>Item                   | 日期 Date |      |       |       |       |       |
|------------------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 5/11    | 7/11 | 10/11 | 11/11 | 13/11 | 15/11 |
| 水温 <sup>①</sup> (C)          | 22      | 21   | 22.5  | 22    | 23.5  | 24    |
| 表层光照<br>强度 <sup>②</sup> (lx) | 2200    | 3500 | 5200  | 5000  | 5000  | 5000  |
| 天气 <sup>③</sup>              | 晴       | 晴    | 晴     | 晴     | 晴     | 晴     |

①Surface temperature, ②Surface light intensity,

③Weather

图 7 为水网藻在秋季的 Logistic 生长曲线,表 3 则为当时的水温、光强及天气条件。由表 3 可见,实验期间天气稳定,晴朗;水温维持在 22℃ 左右;表层光强为 3000~5000lx。结合图 7 可知,在稳定天气条件下,水网藻长势良好,模拟 Logistic 方程得生长率  $r$  为 0.557,方程:

$$N_t = 17 / (1 + 20.25e^{-0.557t}) \quad R^2 = 0.978 \tag{3}$$

图 8 为水网藻在冬季的 Logistic 生长曲线,表 4 为相应的水温、光强和天气条件。由表 4 可知,实验期间天气由晴朗到阴,偶下雨;水温在 19℃ 左右,光强为 1000~3500lx。模拟 Logistic 方程得生长率  $r$  为 0.353,

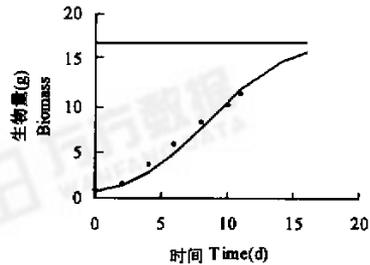


图 8 1998 年 1 月份水网藻水库现场生长曲线

Fig. 8 The growth curve of *H. reticulatum* in the reservoir in January 1998

表 4 1998 年 1 月份天气条件

Table 4 Environmental conditions in January 1998

| 项目<br>Item                   | 日期 Date |      |      |      |      |      |
|------------------------------|---------|------|------|------|------|------|
|                              | 6/1     | 8/1  | 10/1 | 12/1 | 14/1 | 16/1 |
| 水温 <sup>①</sup> (C)          | 18      | 19   | 19   | 19   | 19   | 18   |
| 表层光照<br>强度 <sup>②</sup> (lx) | 6000    | 3500 | 2500 | 3000 | 3300 | 1000 |
| 天气 <sup>③</sup>              | 晴       | 晴    | 晴    | 阴    | 阴    | 阴    |

①Surface temperature, ②Surface light intensity,

③Weather

虽然这 3 次实验的时间、环境条件都不同,但最大环境容纳量  $K$  均为 17g/网袋,表明网袋所能提供的生长空间对水网藻的生长是一个限制因子,保持适当的空间密度,使水网藻维持比较高的生长速率,对于现场实验来说是至关重要的。从水网藻 3 个季度的生长率看,夏季最快,秋季次之,冬季相对最慢,且彼此之间相差比较大。这主要与水温、光照强度、光周期和营养物水平有关。Rhee 等人认为,藻类生长不可能同时受两种营养物抑制;但可以同时受温度和营养物所抑制<sup>[12]</sup>;或同时受光照和营养物所限制<sup>[13]</sup>,彼此之间有相互作用。至于光照、温度和营养物是否可同时相互作用,限制藻类生长,尚未见报道。而它们两两之间如何影响水网藻的生长尚有待实验进一步研究。但有一点可以肯定的是,由于这三者之间的相互作用,使水网藻在夏季生长最好,冬季最差。

水库现场 3 个季度的生长实验结果表明,水网藻在水库全年均能生长,且长势良好。在冬季,虽然外界气温有时下降到 10℃ 以下,但水库水温仍能维持在 19℃ 左右,使水网藻在冬季也能正常生长。王朝晖等在实验室的研究结果也表明水网的适温范围比较大,在 10~31℃ 时均可生长良好<sup>[2]</sup>。因此,水网藻全年都能在水库现场生长,发挥净化水质的功能,无须越冬保种。在本现场试验之前,已于 1997 年年初开始投放水网藻净化该水库水质。在水库现场水网藻净化区,从开始投放水网藻净化水质到 1997 年 11 月中旬近一年时间内,共采收了水网藻约 8000kg(鲜重)。由于水网藻鲜重与干重比约为 10:1,而细胞含氮量约为 3%~5.1%,因而可估计 1997 年内已除去氮约 24~48kg。在一般的污水处理中,总氮的去除率最高约为 70%左右,按水库全年总氮平均水平为 4.0mg/L 计算,相当于处理水量 8600~14000t。

### 3 结论

水网藻在总氮 0.9~45mg/L,氮磷比 5~50 范围内能正常生长,最佳生长氮磷比为 15;水网藻能优先吸收利用氨氮,并在短时间内能快速地吸收去除氮磷;水体处于磷限制状态时,水网对总氮的吸收去除能力略受影响,但影响不大。水网藻在我国南方水库现场全年都能快速生长。因此,可以考虑利用水网藻作为改善我国南方富营养化水库水质的一种辅助措施。

### 参考文献

- [1] Hawes I and Smith R. Influence of environmental factors on the growth in culture of a New Zealand strain of the fast-spreading algae *Hydrodictyon reticulatum* (water net). *J. of Applied Phycology*, 1992, **5**(4):437~445.
- [2] 王朝晖,骆育敏,林秋奇,等. 环境条件对水网藻生长的影响. 应用生态学报, 1999, **10**(3):345~349.
- [3] 王朝晖,林秋奇,杞桑,等. 水网藻在不同环境条件下对氮磷的吸收能力. 中国环境科学, 1999, **19**(3):257~261.
- [4] 王朝晖,江天久,杞桑,等. 水网藻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.
- [5] Heckey R G and Killham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments; a review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.*, 1988, **33**:796~822.
- [6] Greed I F, Havas M and Trick C C. Effect on absenate on growth of nitrogen- and phorous-limited *Chlorella vulgaris* (Chlorophyceae) isolatates. *J. Phycol.*, 1990, **26**: 641~650.
- [7] 金相灿,屠清英编. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [8] 宋仁元,张亚杰,等译. 水和废水标准检验法. 北京:中国建筑工业出版社,1985.
- [9] Rhee G-Yull. Effects of N : P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition, and nitrate uptake. *Limnol. Oceanogr.*, 1978, **23** (1): 10~25.
- [10] 黄玉瑶,高玉荣,等. 氮对藻类生长与污水净化的影响. 生态学报, 1990, **10**(4): 301~304.
- [11] Sary J, et al. The uptake of ammonium, nitrite and nitrate ions by *Hydrodictyon reticulatum*. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* 1987, **15** (2): 193~198.
- [12] Rhee G-Yull and Gotham I J. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: Temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr.*, 1981, **26**(4): 635~648.
- [13] Rhee G-Yull and Gotham I J., The effect of environmental factors on phytoplankton growth: light and the interactions of light with nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr.*, 1981, **26**(4): 649~659.