

# pH 及无机氮化合物对细脉浮萍生长的影响

种云霄, 胡洪营, 钱 易

(环境模拟与污染控制国家重点实验室, 清华大学环境科学与工程系 100084)

**摘要:** 研究以细脉浮萍 (*Lemna aequinoctialis*) 为研究对象, 在完全培养液的基础上模拟生活污水的氨氮、硝酸氮浓度和 pH 范围, 研究了培养条件对其生长的影响。结果表明, 这个浮萍种对 pH 耐受的底限在 4~5 之间, 最适 pH 范围为 5~6。非离子态的氨会对其生长产生抑制作用, 在氨氮为唯一氮源的条件下, 非离子态氨的浓度大于 0.1mg/L 时会对此种的生长产生明显的抑制作用, 接近 2mg/L 时, 基本上致死。在研究的氨氮和硝酸氮浓度范围内 (<40mg N/L), 铵根离子和硝酸根离子浓度增加可促进细脉浮萍的生长。氨氮中生长的植株过氧化物酶活性高于硝酸氮中的活性。

**关键词:** 浮萍属; 氨氮; 硝酸氮; 污水处理

## Effects of inorganic nitrogen compounds and pH on the growth of duckweed *Lemna aequinoctialis*

CHONG Yun-Xiao, HU Hong-Ying, QIAN Yi (Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2293~2298.

**Abstract:** Duckweed has a good potential to recover nutrients from the domestic wastewater. However, inorganic nitrogen compounds and pH of the wastewater may affect the growth of duckweed. In this study, we have investigated the effects of the above two parameters on the growth of *Lemna aequinoctialis*, a duckweed species from South China. The duckweed was collected from a wetland nearby Dianchi Lake in Yunnan, China, where it existed together with *Lemna minor* and *Spirodela polyrrhiza* which are common duckweed species in China. Compared to *L. minor* and *S. polyrrhiza*, the population of *L. aequinoctialis* is very small and sparsely distributed in the wetlands. In our preliminary laboratory study, we found that *L. aequinoctialis* had different growth characteristics from the other two duckweed species in response to changes of pH and ammonium and nitrate concentrations of the domestic wastewater.

Laboratory-scale experiments were performed using an artificial medium. Six levels of pH (4~9) and three different concentrations of both ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen (3.5, 20, and 40 mg N/L) were used in the experiments. The experiments lasted 15 days. The relative growth rates were calculated based on duckweed fronds and fresh weight. The chlorophyll content and the peroxidase activity in fresh fronds were measured to determine the physiological response of the duckweed to different experimental conditions.

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(G1999045711)

**收稿日期:** 2003-04-25; **修订日期:** 2003-08-28

**作者简介:** 种云霄(1974~), 女, 博士生, 主要从事污水氮磷资源化的研究。E-mail: cyx00@mails.tsinghua.edu.cn

**Foundation item:** The major state Basic Research Development Program of China(No. G1999045711)

**Received date:** 2003-04-25; **Accepted date:** 2003-08-28

**Biography:** CHONG Yun-Xiao, Ph. D. candidate, main research field: the recovery of nutrients from wastewater

The experimental results indicated that the lowest value of pH *L. aequinoctialis* could tolerate was between 4 and 5 and the duckweed could grow the best at the pH value between 5 and 6. The growth of *L. aequinoctialis* was inhibited by ammonia when the pH value was above 6. The inhibition was caused by unionized ammonia ( $\text{NH}_3$ ). When the level of unionized ammonia was above 0.1 mg/L, the inhibitory effect increased gradually with the increase of unionized ammonia concentration. It resulted in the death of all the duckweed fronds when the ammonia level was about 2 mg/L. Neither ionized ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) nor nitrate had inhibitory effect on the growth of *L. aequinoctialis*. The duckweed could growth very well when nitrate was the sole nitrogen source in the medium. Moreover, the relative growth rate of *L. aequinoctialis* increased with the increase of ionized ammonium and/or nitrate concentrations under the experimental conditions ( $<40$  mg N/L). Peroxidase Activity of *L. aequinoctialis* in the ammonia culture was higher than that in the nitrate culture because of the toxicity of ammonia. Compared to *L. minor* and *S. polyrrhiza*, *L. aequinoctialis* preferred to grow in slightly acidic medium. This is probably because *L. aequinoctialis* is more sensitive to unionized ammonia in the medium.

**Key words:** ammonia nitrogen; duckweed; *Lemna aequinoctialis*; nitrate nitrogen, wastewater treatment  
文章编号: 1000-0933(2003)11-2293-06 中图分类号: Q703.1 文献标识码: A

浮萍科植物是在以大型水生植物为主的污水处理系统中利用较多的类群之一<sup>[1,2]</sup>, 由于它们的生长速度快, 组织氮磷含量高, 生物体易于加工处理并且用途广泛等特点<sup>[3]</sup>, 其在废水无机氮磷等营养物质的资源化方面具有非常大的应用潜力。近年来利用其吸收转化废水中的无机氮磷逐渐成为水处理领域的研究热点<sup>[4,5]</sup>。

但是废水中无机氮化合物可能会对浮萍的生长产生影响。废水中的无机氮主要以 3 种形式存在: 非离子态的氨( $\text{NH}_3$ )、离子态的氨( $\text{NH}_4^+$ )和硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )。研究者已经发现, 许多浮萍科植物不能耐受水中高浓度的氨<sup>[6,7]</sup>, 并且氨的毒害作用不完全是由  $\text{NH}_3$  引起的, 高浓度的  $\text{NH}_4^+$  也有一定的影响<sup>[8]</sup>, 由于  $\text{NH}_3$  的比例是与水中 pH 相关的, 因此 pH 对氨的毒性也会有很大的影响<sup>[9]</sup>。对于  $\text{NO}_3^-$ , 由于植物体内硝酸还原酶活性不同, 不同种植物利用  $\text{NO}_3^-$  的能力也是不同的, 其中有关浮萍科对  $\text{NO}_3^-$  的利用研究还比较少<sup>[10]</sup>。除了影响氨的毒性外, pH 本身过低或过高也会影响植物的生长<sup>[11]</sup>。因此对浮萍科植物在废水条件下生长特点的研究是非常有必要的。

根据记载, 浮萍科在我国分布有 3 属 5 种<sup>[12]</sup>, 为了探讨它们在废水氮磷资源化方面的应用潜力, 本研究从野外采回最为常见的小浮萍(*Lemna minor*)和紫背浮萍(*Spirodela polyrrhiza*)的种群进行驯化培养, 在培养过程中发现在这两个种群中零星散布的另一个浮萍种类: 细脉浮萍(*Lemna aequinoctialis*)前期研究表明该种在 pH 及无机氮的耐受方面与前两个种有着很大的差异, 因此本文就废水中常见的两种形式的无机氮<sup>[14]</sup>和 pH 对该种生长的影响进行了较为系统的研究, 希望为其在污水脱氮除磷的处理中的应用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 萍种及培养条件

细脉浮萍采自云南滇池附近湿地, 带回实验室后用经过曝气生物滤池处理的生活污水(pH 6~8, COD 10~50mg/L, 氨氮 10mg/L 左右, 总氮 40mg/L 左右)驯化培养, 生物量大量扩增后用作试验材料。

实验期间培养条件: 温度 26~30 C, 光照 40~60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 光暗时间比为 16:8h。试验用培养基以用于青萍培养的完全培养液<sup>[15]</sup>为基础, 其中 pH、氮源按实验要求进行调整。完全培养液成分为:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 20mg/L;  $\text{CaCO}_3$ , 15 mg/L;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  50mg/L;  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 40mg/L;  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 50 mg/L;  $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ , 1 mg/L;  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 1.42 mg/L;  $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 1.5 mg/L;  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 6.59 mg/L;  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 2.52 mg/L;  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.39 mg/L;  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.09 mg/L;  $\text{CaCO}_3$  用浓盐酸溶解。其中



pH 值、氮源按实验要求进行调整,培养液用 KOH 调节 pH 值。

植株培养在 250ml 的塑料烧杯中进行,每个放入培养液 200ml,实验开始时放入大小均一生长健壮的植株叶片 20 片(鲜重平均 0.013g),实验均设两个平行。

## 1.2 实验设计

**1.2.1 pH 对细脉浮萍生长的影响** 完全培养液以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  为氮源,氮(3.5mg N/L)浓度较低,既可以满足浮萍生长氮的需要又不会影响其生长,因此本试验以完全培养液为基础,依据废水常见的 pH 范围设计 6 个 pH 值:4、5、6、7、8、9(变动范围 $\pm 0.3$ )来考察 pH 对生长的影响。完全培养液配制时  $\text{CaCO}_3$  用稀盐酸溶解,因此 pH 约在 3~4,用 6mol/L 的 KOH 调整到实验的 pH 值。生长过程中溶液的 pH 由于植株生理代谢的调节发生变动,因此每天监测 pH 值,必要时用 HCl 和 KOH 调整到设定值。实验过程中,每 5d 换 1 次培养液(使实验期间培养液各组分浓度基本保持恒定及防止藻类繁生),每 3d 计 1 次叶片数。各 pH 水平培养时间均为 15d,在实验结束时捞出生物量称鲜重,取鲜叶片测定叶绿素含量。

**1.2.2 氨和硝酸根在不同 pH 对细脉浮萍生长的影响** 将完全培养液中的氮分别用  $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NaNO}_3$  代替,使氮源分别为完全的氨氮和硝酸氮,氮的浓度依据生活污水的范围设计两个:20mg N/L 和 40mg N/L,pH 值设计与调整与上相同。实验过程中,每 5d 换 1 次培养液,每 3d 计 1 次叶片数。实验培养时间仍为 15d,在实验结束时捞出生物量称鲜重,测定鲜叶片的叶绿素含量和过氧化物酶活性。

## 1.3 分析方法

**1.3.1 生物量测定** 生物量采用叶片数(Fronds)和鲜重(Fresh weight, FW)两种指标表示,叶片数通过直接计数获得,鲜重则是捞出后用滤纸吸干叶片表面水珠,晾干 10min 后在天平上称量。生物量增加以相对生长率(Relative growth rate)RGR 来衡量,按下式计算<sup>[16]</sup>;

$$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t}$$

式中, $W_2$  为试验结束时的生物量; $W_1$  为试验开始时的生物量; $t$ :实验进行时间;RGR 为负值时表明植株已受到毒害逐渐死亡,RGR 大于等于 0 时表明所设置条件植株可以生长耐受。

**1.3.2 鲜叶的叶绿素** 叶绿素与植物光合作用有关,因此叶绿素含量可以反映植株的生理活性。叶绿素(mg/g)用 95%的乙醇提取后用比色法测量<sup>[17]</sup>。

**1.3.3 过氧化物酶活性** 过氧化物酶是植物体内普遍存在的一类氧化酶,它在植物体内具有多种生理功能,其中包括植物受到环境胁迫时的应激反应。本研究中采用愈创木酚法测定,以每分钟  $A_{470}$  变化 0.01 为 1 个过氧化物酶活性单位(u),酶活性以单位时间单位鲜重的酶活单位表示(u/(g·min))<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH 值对细脉浮萍生长的影响

由图 1 可见,生长在完全培养液中的细脉浮萍,在 pH5~6 时相对生长率较大,6 时达最大,之后随 pH 增加相对生长率亦明显下降,但仍大于 0,由此可见尽管 pH 大于 6 时,植株的生长受到抑制作用,但仍能耐受。而当 pH 小于 5 时,此种相对增长率开始急剧下降,在 pH4 时已变为负值,可见此时其生长已受到毒害作用逐渐死亡。叶绿素测定结果表明待种鲜叶片的叶绿素含量,在 pH5~9 范围内,随 pH 升高而略有下降(图 3)。

从本试验的结果来看,此细脉浮萍最适生长的 pH 在 5~6 范围内,pH 再降低会由于  $\text{H}^+$  浓度过高受到毒害作用而致死。因此其能够耐受的最低 pH 值约在 4~5 之间。当 pH 大于 6 时,此种的生长也受到了明显的抑制,可能是由于  $\text{OH}^-$  浓度的增加导致了对生长的抑制。细脉浮萍对 pH 的耐受性与小浮萍和紫背浮萍明显不同,在研究中发现,同样条件下,小浮萍生长的最适 pH 范围为 6~9,紫背浮萍的最适 pH 为 7 左右,因此与这两个种相比,该待种更倾向于偏酸的环境。

### 2.2 硝酸根对细脉浮萍生长的影响

由图 2 可见,细脉浮萍生长在含有 20 和 40mg/L 硝酸盐氮浓度下的培养液中,相对生长率基本上没有变化,并且在这两个浓度下,随 pH 的变化也不大,在 pH5~9 范围内,RGR 值均在 0.2/d 左右,但与完全培

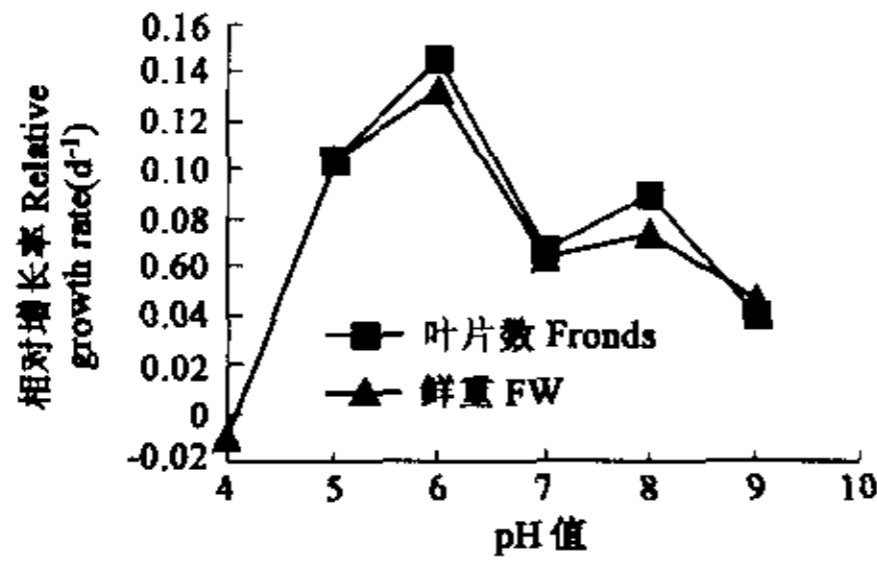


图1 完全培养液中细脉浮萍相对生长率随 pH 的变化  
Fig. 1 Relative growth rate of *Lemna aequinoctialis* in balance culture under different pH

—▲—叶片数(Frond); —■—鲜重(FW)

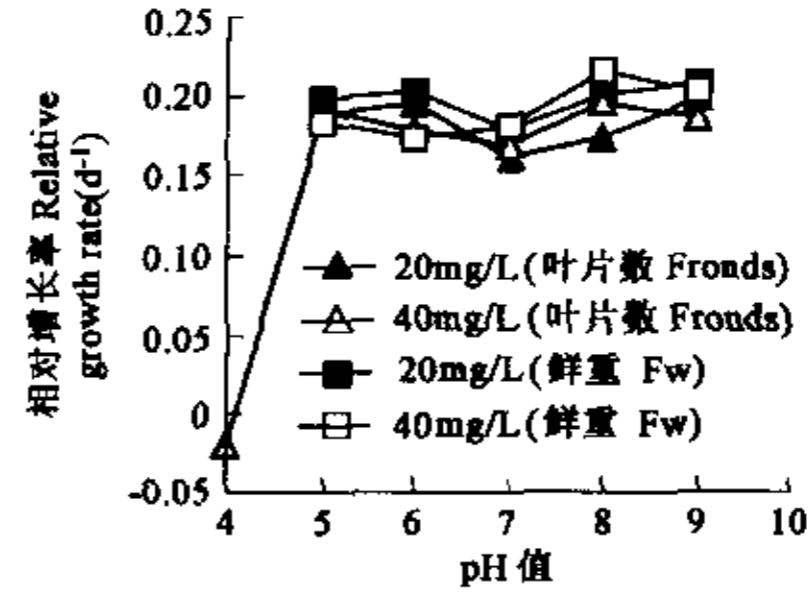


图2 在不同硝酸氮培养液中细脉浮萍的相对生长率随 pH 的变化  
Fig. 2 Relative growth rate of *Lemna aequinoctialis* in different nitrate concentration with different pH

—▲—20mg/L(叶片数 Fronds); —△—40mg/L(叶片数 Fronds)  
—■—20mg/L(鲜重 Fw); —□—40mg/L(鲜重 Fw)

养液中的最大值 0.14/d 相比,明显增加。鲜叶片的叶绿素含量在 20mg/L 和 40mg/L 的硝酸氮及氨氮浓度下却明显低于完全培养液中生长的植株,并且硝酸氮中培养的叶绿素含量略高于氨氮培养中的含量(图 3)。而细脉浮萍的过氧化物酶活性在这两个硝酸氮浓度下则是随 pH 增加逐渐减小,并且普遍低于相同浓度氨氮中的过氧化物酶活性(图 4)。

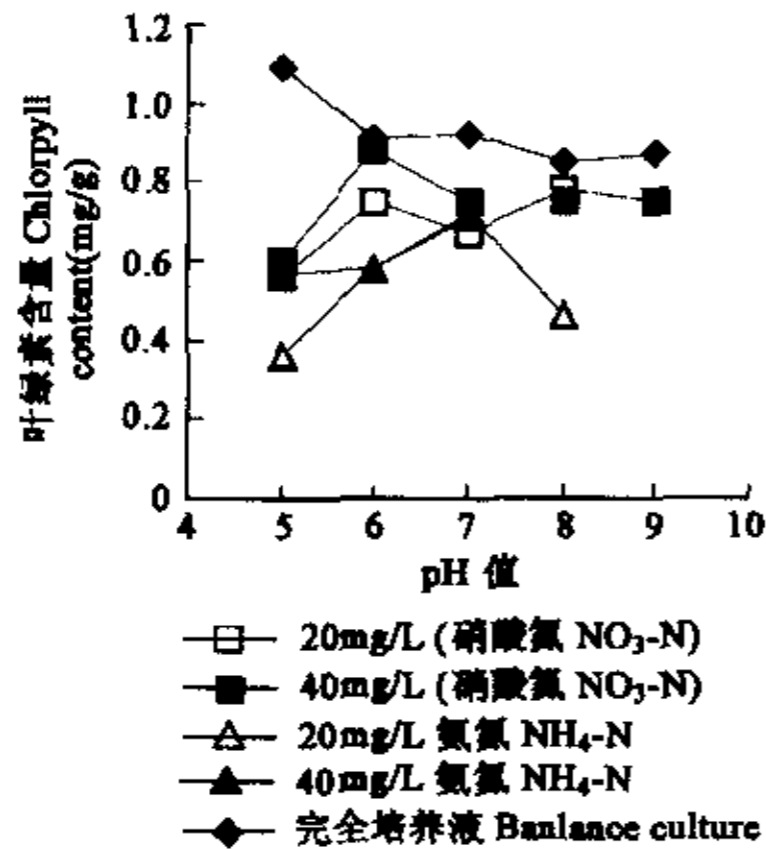


图3 不同氮的浓度下细脉浮萍叶绿素含量在随 pH 的变化  
Fig. 3 Chlorophyll content of *Lemna aequinoctialis* in different nitrogen concentration under different pH

—□—20mg/L(硝酸氮 NO<sub>3</sub>-N); —■—40mg/L(硝酸氮 NO<sub>3</sub>-N)  
—△—20mg/L 氨氮 NH<sub>4</sub>-N; —▲—40mg/L 氨氮 NH<sub>4</sub>-N  
—◆—完全培养液 Balance culture

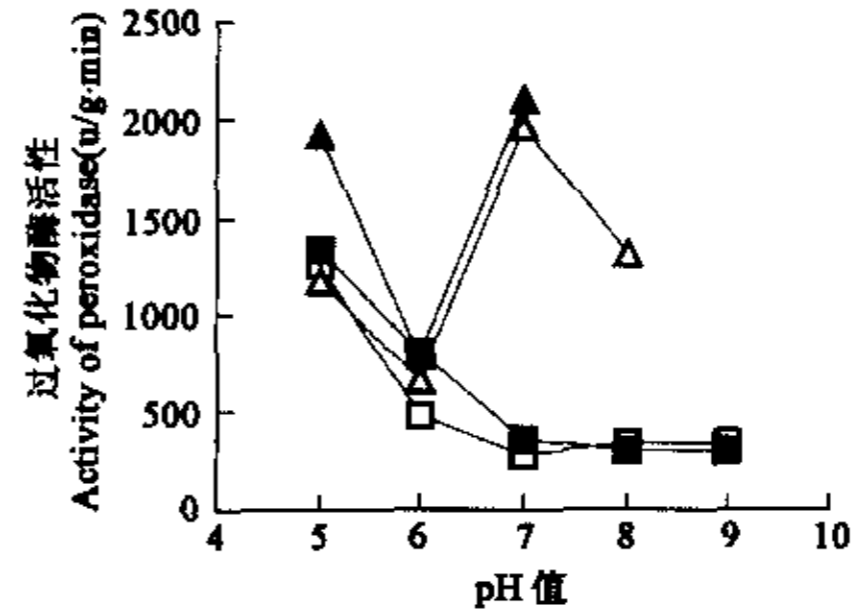


图4 细脉浮萍过氧化物酶活性在不同氮浓度下随 pH 的变化  
Fig. 4 Activity of peroxidase of *Lemna aequinoctialis* in different nitrogen concentration under different pH

—▲—20mg/L(叶片数 Fronds); —■—40mg/L(叶片数 Fronds)  
—△—20mg/L(鲜重 Fw); —□—40mg/L(鲜重 Fw)

以上试验结果表明,细脉浮萍可以利用硝酸氮作为无机氮源,与完全培养液(总氮:7mg/L,硝酸氮浓度 3.5mg/L,)相比,硝酸氮的浓度升高还可提高此种的生长速率,但硝酸氮浓度从 20mg/L 升高到 40mg/L 生长率基本上没有变化,可见小于等于 20mg/L 硝酸氮就己能满足其生长需要。同时由于进入植物体内的多余部分硝酸氮会被储存在液泡中,以维持细胞内离子平衡,从而避免对细胞结构造成伤害<sup>[18]</sup>,使得高的硝酸氮浓度对其生长没有抑制作用。而且在以硝酸氮为氮源时,能够耐受的最低 pH 约在 4 到 5 之间,与完全培养液中相同,但与完全培养液相比不同的是,pH 在 6 到 9 范围内,其生长并没有受到抑制,可见在以硝酸氮为氮源时,OH<sup>-</sup> 浓度增加不会对其产生毒害作用。

2.3 氨对细脉浮萍生长的影响

由图 5 可见,在含有 20mg/L 和 40mg/L 氨氮的培养液中,在 pH5 和 6 时,细脉浮萍的相对生长率都很



高,随 pH 增加,相对生长率开始急剧下降。其中在 pH8 时,还可耐受 20mg/L 氨氮,而氨氮增加到 40mg/L 时则对其产生明显的毒害作用,相对生长率变为负值。在 pH9 时两个浓度下,相对生长率均为负值。与完全培养液相比,在 pH5~6 时,这两个浓度的氨氮培养液中此待定种的相对生长率均达到 0.2/d,与硝酸氮培养液中的生长类似,但高于完全培养液中的生长率。

从本试验的结果可以看出,细脉浮萍在总氮浓度在 7~20mg/L 的培养液中,无论是氨氮还是硝氮其浓度增加都会对其生长产生促进作用,而在对小浮萍和紫萍进行的同类研究中,均没有发现这种现象(研究结果另文发表),由此可见此种的生长可能对氮的需求较高,因此在污水脱氮方面具有较好的应用前景。但是此种在含有氨氮的培养液中,生长会随 pH 升高受到明显的抑制作用,这主要是由于培养液中非离子态氨的解离增加所致。根据氨在水中的解离规律,低 pH 下,氨在水中主要以铵根离子形式存在,随 pH 增加非离子态氨所占比例增加。由此可知,在以氨氮为氮源时,细脉浮萍受到的抑制完全是由于非离子态氨的作用,而铵根离子浓度增加没有抑制作用,并且在本试验浓度范围内对其的生长还具有促进作用。

根据氨在水溶液中的解离平衡式<sup>[9]</sup>:

$$\text{NH}_3(\%) = \frac{100}{1 + 10^{(pK_a - \text{pH})}}$$

式中, $K_a$  为解离常数,与温度和 pH 有关,在确定的温度  $T$  和 pH 值下可以求出非离子态  $\text{NH}_3$  的百分数:

$$K_a = \frac{[\text{NH}_3][\text{H}^+]}{[\text{NH}_4^+]}$$

$$pK_a = \frac{0.09108 + 2729.92}{(273.2 + T)}$$

计算出 3 个氨氮浓度(3.5、20、40)在不同 pH 下解离出的非离子态氨浓度,温度取平均值 27°C,得出细脉浮萍相对生长率随非离子态氨浓度的变化(见图 6)。由图可见,细脉浮萍对非离子态氨相当敏感,当非离子态氨浓度达到 0.1mg/L 时生长即受到明显抑制,当接近 2mg/L 时则受到毒害作用基本致死。

从本研究的实验结果看,细脉浮萍更倾向于生长在偏酸性的(pH5~6)的水中,主要是由于其对非离子态氨的敏感性所致。在采集地水体中,它只是零星存在于小浮萍和紫背浮萍的种群中,可能也由于其生长偏酸性环境有关。因为野外水体多为中性,由于富营养化污染,通常含有一定量的氨氮,而小浮萍和紫背浮萍则倾向于生长在中性水体中,对非离子态氨的耐受性也较高(研究结果另文发表),致使细脉浮萍在群落竞争中处于劣势,生长不良。但与这两个常见种相比,在 pH 适宜时,此种更喜含高氮浓度的水体,因此其在氮磷污水资源化处理方面更具应用前景。

### 3 结论

(1) 本论文所研究的细脉浮萍对 pH 耐受的最低值在 4~5 之间。最适 pH 值在 5~6 之间,高的 pH (<9)对其生长没有影响。

(2) 细脉浮萍可以利用硝酸氮作为唯一氮源,并且硝酸氮在一定的浓度范围(小于 20mg/L)的增加可

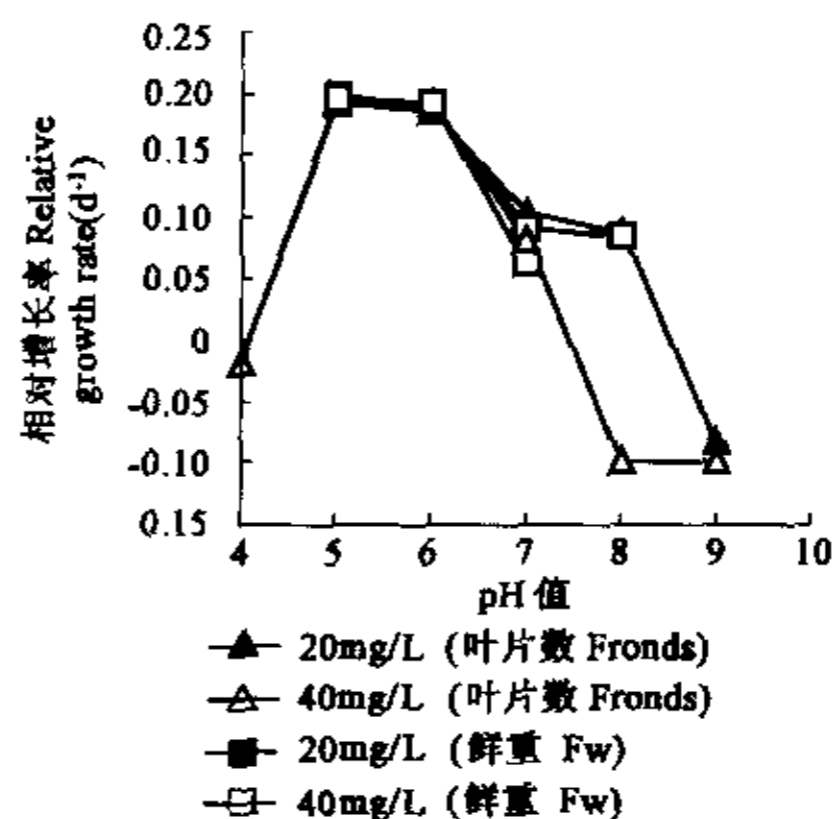


图 5 不同氨氮浓度的培养液中细脉浮萍的相对增长率随 pH 的变化

Fig. 5 Relative growth rate of *Lemna aequinoctialis* in different ammonia concentration with different pH

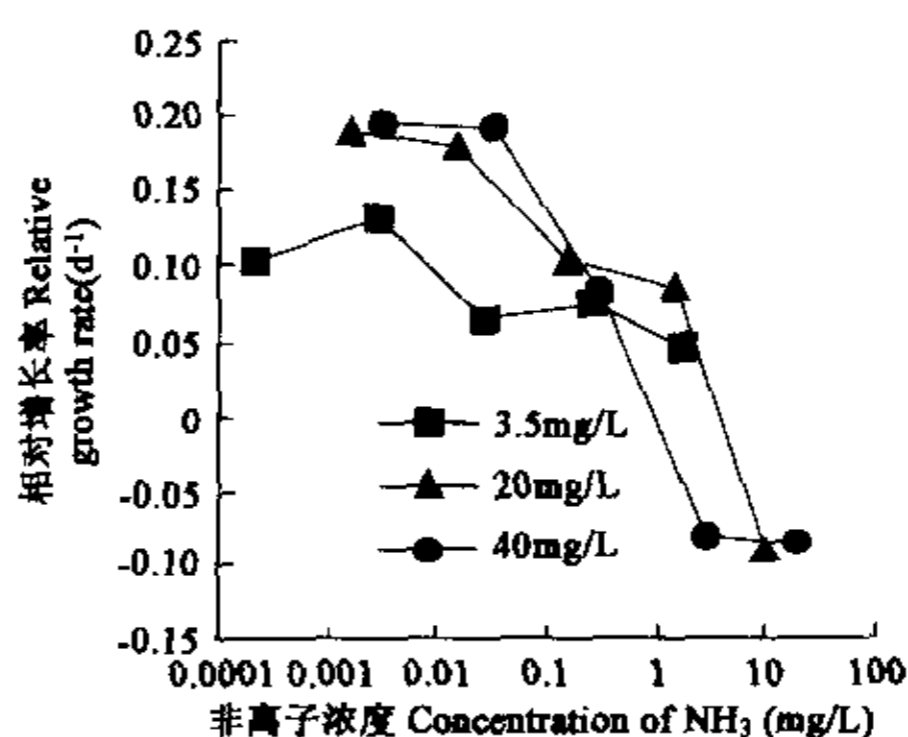


图 6 细脉浮萍的相对增长率非离子态氨浓度的变化

Fig. 6 Specific growth rate of *Lema aequinoctialis* in different concentration of  $\text{NH}_3$

促进其的生长。

(3) 在氨为氮源情况下,当非离子态氨浓度高于 0.1mg/L 时对细脉浮萍生长产生明显抑制作用,高于 2mg/L 基本上致死;铵根离子浓度增加对此种生长没有抑制作用,并且在一定浓度范围内(氨氮小于 20mg/L)对其生长还具有促进作用。

#### References:

- [1] Gijzen H J. Anaerobes, aerobes and phototrophs: A winning team for wastewater management. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(8):123~132.
- [2] Allinson G, Stagnitti F, Colville S, *et al.* Growth of floating aquatic macrophytes in alkaline industrial wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 1999, **26**(12):1103~1107.
- [3] Xu W X, Zhou Y, Hu Z Z. The effect of different ways of processing duckweed on its nutrient value. *Modern farming*, 1998, **3**:35~36.
- [4] Bergman B A, Cheng J, Classen J, *et al.* Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 2000, **42** (2): 263~269.
- [5] Gideon Oron, Louw R Wildschut, Dan Porath. Waste water recycling by duckweed for protein production and effluent renovation. *Water Science and Technology*, 1984, **17**:803~817.
- [6] Clement B and Bouvet Y. Assessment of landfill leachate toxicity using duckweed *Lemna minor*. *The Science of Total Environment*, 1993, **41**(supp): 1179~1190.
- [7] Wang W. Ammonia toxicity to macrophyte (common duckweed and rice) using static and renewal method. *Environment Toxicity and Chemistry*, 1991, **10**:1173~1177.
- [8] Caicedo J R, Van der Steen, Gijzen H J, *et al.* Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). *Water Research*, 2000, **34**(15): 3829~2835.
- [9] Korner S, Das S K, Veenstra S, *et al.* The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. *Aquatic Botany*, 2001, **71**(1): 71~78.
- [10] Reed S C, Crites R W and Middlebrooks E J. *Natural systems for waste management and treatment*. 2nd ed. New York. McGraw-Hill, Inc, 1995. 158~165.
- [11] Lian ZH H. *Principle and technology of planting with soil*. Beijing: Chinese agriculture press, 1992. 46~47.
- [12] Yan S Zh. *Atlas of aquatic plant in China*. Beijing: Science Press, 1983. 294~298.
- [13] Li H. *Lemnaceae Family, Flora in China* 13(2). Beijing. Science Press, 1979. 207~211.
- [14] Zhang Z J ed. *Wastewater treatment*. Chinese Construction Industry Press, 2000. 3~4.
- [15] Zhao, J J. The culture of *Lemna aequinoctialis* 6746 in experiment study about photoperiod. In: Tang Z-Ch ed. *Experimental guide of modern plant physiology*. Science Press, 2000. 76.
- [16] Hunt R. *Plant growth analysis*. Edward Arnold, London, 1978. 67.
- [17] Li H SH ed. *Principle and technology of plant physiology and biochemistry*. High Education Press, Beijing, 2000. 134.
- [18] Marschner H, Trans Cao, Y P and Lu J L. *The mineral nutrient of higher plant*. Beijing agriculture university press, Beijing, 1988. 119~133.

#### 参考文献:

- [3] 许万祥, 周岩, 胡宗则. 不同加工储藏方法对浮萍营养成分的影响. *当代畜牧*, 1998, (3):35~36.
- [11] 连兆煌. 无土栽培原理与技术. 北京: 中国农业出版社, 1992. 46~47.
- [12] 颜素珠. 中国高等水生植物图说. 北京: 科学出版社, 1983. 294~298.
- [13] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 浮萍科, 中国植物志 13(2). 北京: 科学出版社, 1979. 207~211.
- [14] 张自杰主编. 排水工程(下册). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 3~4.
- [15] 中国科学院上海植物生理研究所, 等编. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999. 76.
- [16] R 亨特 著, 陆宪辉译. 植物生长分析. 北京: 科学出版社, 1980. 12.
- [17] 李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000, 134.
- [18] H·马斯纳著. 曹一平, 陆景毅译. 高等植物的矿质营养. 北京: 北京农业大学出版社, 1988. 26~28.