

绿狐尾藻对不同铵硝配比的生理响应

张 瑛^{1,2,3}, 李宝珍^{1,2}, 刘 锋^{1,2}, 罗 沛^{1,2}, 肖润林^{1,2}, 吴金水^{1,2,4}

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所,农业生态系统过程重点实验室,湖南长沙 410125;
2.中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙农业环境观测研究站,湖南长沙 410125;
3.湖南农业大学资源环境学院,湖南长沙 410128;
4.中国科学院大学,北京 100004)

摘要:为了探究高氨养殖废水中一定比例的确态氮对绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)生长及生理特征的影响,采用营养液培养,在总氮浓度为 15 mmol/L 的条件下,以纯铵处理为对照(CK),设置 NH₄⁺ : NO₃⁻ = 3 : 1(以 N_{3:1}表示)和 NH₄⁺ : NO₃⁻ = 1 : 1(以 N_{1:1}表示)两个处理,研究绿狐尾藻对不同铵硝配比的生理响应。结果显示,培养至第 21 天,N_{1:1}处理的相对生物量和相对茎高分别为 13.17 g 和 35.31 cm,显著低于 N_{3:1}(19.59 g, 41.78 cm)和 CK 组(17.82 g, 38.82 cm)(*P* < 0.05)。不同处理下叶片中的氮含量为 50.38~58.82 mg/g,显著高于茎中氮含量 26.96~35.42 mg/g;但叶片中磷含量 5.17~7.38 mg/g 显著低于茎中的磷含量 8.44~9.88 mg/g (*P* < 0.05)。培养至第 21 天时,CK、N_{3:1}、N_{1:1}处理之间的叶片磷含量(6.76、7.06、7.38 mg/g)差异均达到显著水平(*P* < 0.05),表现为 N_{1:1} > N_{3:1} > CK。N_{1:1}和 N_{3:1}处理叶片(7.03、6.75 mg/g)和茎中(6.43、5.04 mg/g)的可溶性糖含量均显著高于 CK(3.58、3.27 mg/g)(*P* < 0.05)。N_{1:1}处理叶片和茎中的叶绿素含量均显著高于 CK 和 N_{3:1}处理(*P* < 0.05)。研究表明,当处理中添加少量或不添加确态氮时,有利于绿狐尾藻生长和生物量增加;当处理中确态氮含量相对较高时,植株叶绿素和可溶性糖含量增加,同时吸收磷的能力增强。绿狐尾藻在不同铵硝配比的水体中均能保持良好的生长状态和较强的氮磷吸收能力,该结果为绿狐尾藻高效净化不同来源的养殖废水提供了理论依据。

关键词:铵硝配比;绿狐尾藻;生长特性;生理响应

中图分类号:Q175,Q945 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)01-0084-07

水生植物构建人工湿地作为修复和净化富营养化污染水体的一种重要手段,相比传统的水质净化技术更加经济和环保(Dhote & Dixit,2009)。在水环境修复过程中,水生植物可以通过根系吸收、根系泌氧及根系分泌物对污染物起净化作用,密集的茎叶和根系对悬浮的污染物也可进行截留(Bezbaruah & Zhang,2005;Huang et al,2010;陆松柳等,2011;Shelef et al,2013)。有研究表明,不同水生植物或者组合对水体中的氮、磷等污染物去除或拦截效果不一(张树楠等,2015;相晨等,2016;郑足红等,2018);其中,以绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)治理的综合效益最高(Zhang et al,2016)。绿狐尾藻为小二仙草科(Haloragidaceae)、狐尾藻属(*Myriophyllum*)植物,属多年生浮水或挺水草本,作为景观植物引入我国已有多年,其对铵态氮有较强的偏好性,能够高效吸收水体中的氮和磷,并且收割的植株可以用来制成饲料或者用作田间绿肥(刘锋等,2018;Liu et al,2018),具有很好的经济效益和生态效益。

养殖废水的氨氮含量高(朱杰等,2009;Liu et al,2016),作为主要的污染物,如何高效去除水体中的氨氮是环境保护和生态学者多年来关注的重点。前期研究表明,种植绿狐尾藻的人工湿地,15 d 内对养殖废水中氨氮的去除率高达 98.8%~99.8%(Liu et al,2016;Zhang et al,2017)。值得关注的是,在绿狐尾藻湿地系统的水体或者底泥中存在一定数量的微生物如硝化细菌,在有氧条件下可以将 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N(Li et al,2018);因此养殖废水中除了存在大量的 NH₄⁺-N,也同时存在一定数量的 NO₃⁻-N。然而,不同来源的养殖废水中微生物

养殖废水的氨氮含量高(朱杰等,2009;Liu et al,2016),作为主要的污染物,如何高效去除水体中的氨氮是环境保护和生态学者多年来关注的重点。前期研究表明,种植绿狐尾藻的人工湿地,15 d 内对养殖废水中氨氮的去除率高达 98.8%~99.8%(Liu et al,2016;Zhang et al,2017)。值得关注的是,在绿狐尾藻湿地系统的水体或者底泥中存在一定数量的微生物如硝化细菌,在有氧条件下可以将 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N(Li et al,2018);因此养殖废水中除了存在大量的 NH₄⁺-N,也同时存在一定数量的 NO₃⁻-N。然而,不同来源的养殖废水中微生物

收稿日期:2019-07-26
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0101100);国家自然科学基金(42077103);湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-52);湖南省国际科技创新合作基地项目(2018WK4012)。
作者简介:张瑛,1991 年生,女,博士研究生,研究方向为水生植物营养机理。E-mail:zhangying9629@126.com
通信作者:李宝珍,女,副研究员,主要从事农业面源污染生态治理研究。E-mail: bzli@isa.ac.cn

的种类和数量存在差异,因此不同污染水体中的铵硝配比也不尽相同。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 作为不同的氮素形态,对植物的生理调控具有不同的功效和机能(陆景陵,2003),其不同对比对植物生长的影响,在旱地植物中已有较为广泛的研究(李宝珍等,2008;卢颖林等,2010;樊卫国和葛会敏,2015);但在水生植物中鲜有报道,尤其是绿狐尾藻这种湿地先锋植物,生长良好是高效净化水体的前提和基础。本研究旨在探究水体中不同的铵硝配比对其生长发育、生理特征的影响,以期为进一步研究绿狐尾藻高效净化不同来源的养殖废水提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用绿狐尾藻采自中国科学院长沙农业环境观测研究站。将取得的 20~30 cm 新鲜植物样品,先用自来水冲洗,然后用蒸馏水清洗,最后将其幼苗在 Hoagland 营养液(表 1)中培育 10 d 左右,每 4 d 更换营养液,使用 NaOH 和 HCl 调节营养液的 pH 值为 6.8~7.0。

1.2 实验设计

本课题组的前期研究表明,绿狐尾藻在 15 mmol/L 的铵浓度下生长较好(刘少博等,2017)。因此,设置 100% NH_4^+ 为对照组(CK), $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-=3:1$ (以 $\text{N}_{3:1}$ 表示)和 $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-=1:1$ (以 $\text{N}_{1:1}$ 表示)两个铵硝配比处理组(硝态氮含量≤铵态氮含量,以模拟真实养殖废水的营养条件),总氮浓度均为 15 mmol/L。每个处理 3 次重复。选取上述培养至生长健壮且大小一致的绿狐尾藻 20 株(每株采集顶枝 12 cm),放置于 8 L 不同铵硝配比的营养液中培养,除氮素营养外,其它营养元素按表 1 的 Hoagland 的营养液进行配制,生长溶液每天调节 pH 为 6.8~7.0,每 4 d 更新营养液。整个试验培养周期为 21 d(Zhou et al,2017)。

表 1 Hoagland 营养液的配方及成分

Tab.1 Formulation and composition of Hoagland nutrient solution

成份	浓度/ mmol · L ⁻¹	成份	浓度/ μmol · L ⁻¹
(NH ₄) ₂ SO ₄	2.0	MnCl ₂ · 4H ₂ O	9.10
KH ₂ PO ₄	0.3	H ₃ BO ₃	36.70
K ₂ SO ₄	0.35	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.77
MgSO ₄ · 7H ₂ O	2.5	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.32
CaCl ₂ · 2H ₂ O	2.5	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.39
		EDTA-Fe	20

1.3 指标测定

茎高和根长直接采用直尺测量;生物量和茎高分别于第 1、3、7、10、14、21 天取样测量;根长分别于第 7、10、14、21 天测量。于第 10、14、21 天采样,将植株放入烘箱 105℃ 杀青 30 min,然后烘干至恒重,用浓硫酸-过氧化氢消煮,测植株全氮和全磷(鲍士旦,2000)。水分含量、可溶性糖和叶绿素含量均在第 21 天取样测定,叶绿素 a(Chl-a)和叶绿素 b(Chl-b)的含量采用植株鲜样测定,采用 95%乙醇提取,分光光度法测定(Sartory & Grobbelaar,1984);总叶绿素(T_{chl})的含量等于叶绿素 a 与 b 之和。可溶性糖采用蒽酮比色法测定(张振清,1985)。相对生物量(relative biomass, g)、相对茎高(relative stem height, cm)和水分含量(water content, %)计算公式如下:

相对生物量= $W_n - W_0$ ①

相对茎高= $SH_n - SH_0$ ②

水分含量= $(1 - D_w/F_w) \times 100\%$ ③

式中: W_0 和 W_n 分别指起始和第 n 天采样时测定的生物量(g), SH_0 和 SH_n 分别指起始和第 n 天采样时测定的茎高(cm), D_w 和 F_w 分别指植株干重(g)和植株鲜重(g)。

1.4 数据分析

数据均为平均值,误差线均为标准误。数据统计利用 SPSS19.0 软件,进行方差分析和 Fisher's 显著性检验(LSD),比较不同处理间在 $P<0.05$ 的显著性水平。采用 Microsoft Office Excel 2016 进行数据分析和作图。

2 结果与分析

2.1 生长特性

3 个组别的相对生物量均随培养时间的增加而增加。培养至第 7 天和第 14 天时, $\text{N}_{1:1}$ 和 $\text{N}_{3:1}$ 处理的相对生物量均显著低于 CK($P<0.05$)。培养至第 10 天时, $\text{N}_{3:1}$ 处理的相对生物量显著低于 CK($P<0.05$)。培养至第 21 天时, $\text{N}_{3:1}$ 的相对生物量为 $(19.59 \pm 0.02)\text{g}$,高于 CK 的 $(17.82 \pm 1.68)\text{g}$ 约 10.0%,但二者的差异未达显著水平($P>0.05$); $\text{N}_{1:1}$ 的相对生物量为 $(13.17 \pm 1.66)\text{g}$,显著低于 CK($P<0.05$)(图 1-a)。

随着培养时间的增加,各处理的相对茎高都明显增加。培养前期,对照组的茎生长较快,培养至第 1 天、第 3 天和第 10 天时,相对茎高均表现为:CK $> \text{N}_{1:1} > \text{N}_{3:1}$ 。培养后期, $\text{N}_{3:1}$ 处理的茎生长较其

它两组快;培养至第14天和第21天时, $N_{3:1}$ 的相对茎高分别为 (28.94 ± 3.02) cm和 (41.78 ± 1.29) cm,显著高于CK($P<0.05$);至第21天时, $N_{1:1}$ 的相对茎高仅 (35.31 ± 1.20) cm,显著低于CK($P<0.05$)(图1-b)。

培养至第7天时, $N_{3:1}$ 和 $N_{1:1}$ 的根长分别为CK的89.5%和85.0%,前两者和后者差异达到显著水平($P<0.05$);而在第14天和第21天时,两个处理的根长显著高于CK($P<0.05$),培养结束时分别高出27.1%和24.8%;但 $N_{1:1}$ 和 $N_{3:1}$ 处理之间没有显著差异($P>0.05$)(图1-c)。

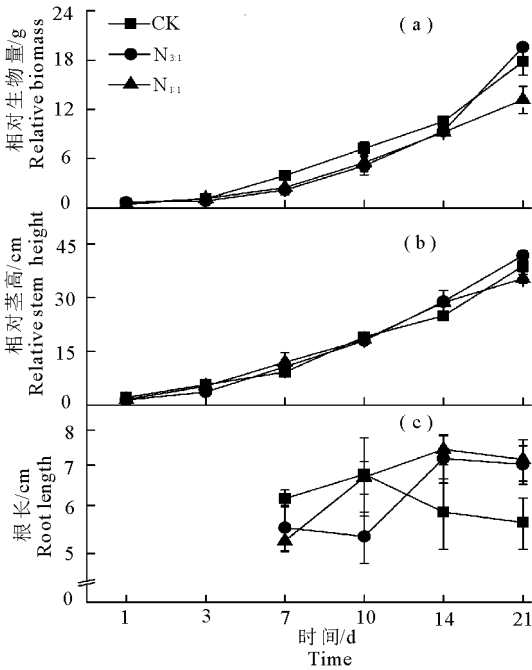


图1 不同铵硝配比的绿狐尾藻生长特性
Fig.1 Growth characteristics of *M. aquaticum* with different NH_4^+/NO_3^- treatments

2.2 氮磷含量变化

绿狐尾藻叶中的氮含量随培养时间推移大体上呈现先升高、后降低的趋势,各处理之间差异不显著,培养至第10天、第14天和第21天时,CK组、 $N_{3:1}$ 和 $N_{1:1}$ 处理组的叶片氮含量分别达到53.38~56.57 mg/g、52.15~58.82 mg/g和50.38~56.58 mg/g。茎中氮含量变化趋势与叶相似,3组分别为31.44~33.72 mg/g、28.72~35.42 mg/g和26.96~32.02 mg/g,均在第14天时达到最大,且 $N_{3:1}$ 处理的氮含量显著高于 $N_{1:1}$ 处理($P<0.05$),对照组处于二者之间;第10天和21天时,各处理间无显著差异。叶片中的氮含量显著高于茎中氮含量($P<0.05$)(图2-a)。

与氮含量相反,茎中的磷含量8.44~9.88 mg/g

显著高于叶片中的磷含量5.17~7.38 mg/g ($P<0.05$)。茎中的磷含量随时间变化呈现出先增加、后降低的趋势;而在叶片中表现出相反的趋势,随着时间的推移,叶片中的磷含量先略微地降低、而后升高。茎中磷含量在各处理之间没有显著差异,但 $N_{1:1}$ 处理第21天的茎中磷含量高出CK10.9%,但未达到 $P<0.05$ 的显著水平。

在叶片中, $N_{1:1}$ 和 $N_{3:1}$ 处理第14天的磷含量要显著高于CK($P<0.05$),分别高出20.4%和15.7%;实验进行至第21天时,CK、 $N_{3:1}$ 、 $N_{1:1}$ 处理之间的叶片磷含量(6.76、7.06、7.38 mg/g)差异均达到显著水平($P<0.05$),表现为 $N_{1:1}>N_{3:1}>CK$ (图2-b)。

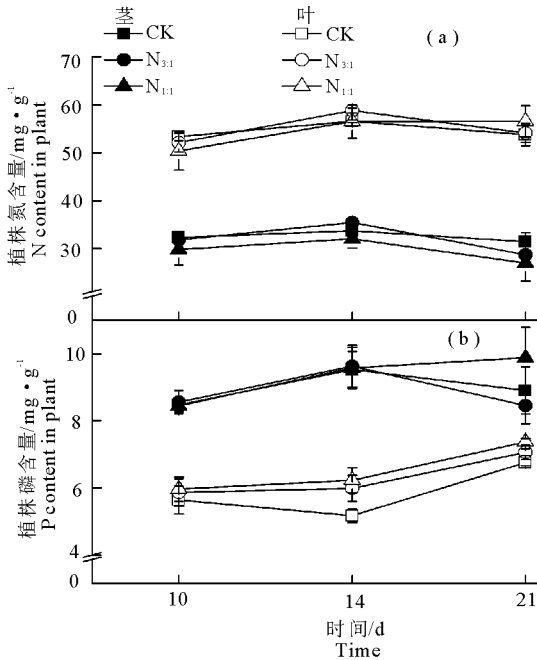


图2 不同铵硝配比的绿狐尾藻植株氮磷含量
Fig.2 Variation of nitrogen and phosphorus contents in *M. aquaticum* with different NH_4^+/NO_3^- treatments

2.3 水分含量

CK组绿狐尾藻植株水分含量为92.4%; $N_{3:1}$ 处理为90.9%; $N_{1:1}$ 处理的水分含量显著低于CK($P<0.05$),仅为89.7%(图3)。

2.4 可溶性糖含量

可溶性糖含量则与水分含量相反,无论叶片还是茎中, $N_{1:1}$ 处理(7.03、6.43 mg/g)和 $N_{3:1}$ 处理(6.75、5.04 mg/g)的可溶性糖含量均显著高于CK(3.58、3.27 mg/g)($P<0.05$),两个处理的叶片可溶性糖含量均为CK的1.96倍;而其茎中可溶性糖含量分别高于CK组88.5%和54.1%;叶片的可溶性糖含量均略高于茎(图4)。

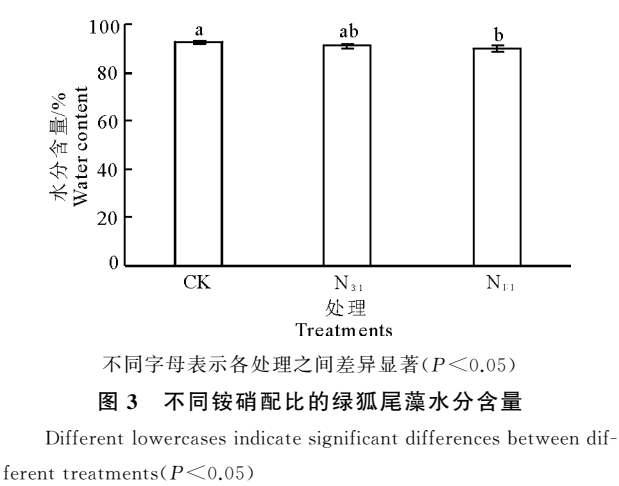


图 3 不同铵硝配比的绿狐尾藻水分含量

Different lowercases indicate significant differences between different treatments($P<0.05$)

2.5 叶绿素含量

在叶片中,叶绿素 a、b 和总叶绿素保持一致的趋势,均表现为 N_{1:1} 处理显著高于 N_{3:1} 和 CK ($P<0.05$);N_{1:1} 处理的叶绿素 a、b 和总叶绿素含量(0.620、0.692、1.312 mg/g)分别为 CK(0.418、0.524、0.942 mg/g)的 1.5、1.3 和 1.4 倍,N_{3:1} 的各叶绿素含量(0.459、0.528、0.987 mg/g)也略高于 CK,但未达到 $P<0.05$ 的显著水平(图 5-a)。

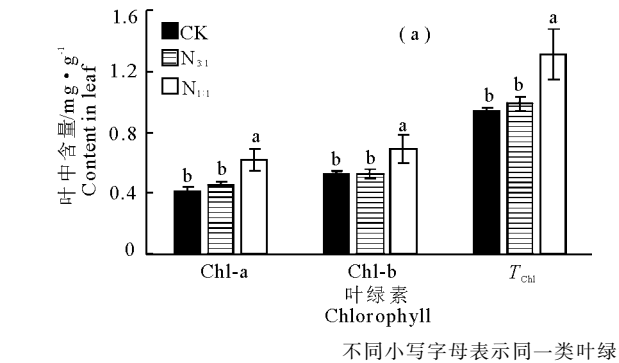


图 5 不同铵硝配比的绿狐尾藻叶绿素含量

Different lowercases indicate significant differences between different treatments for the same chlorophyll category ($P<0.05$)

Fig.5 Chlorophyll content of *M. aquaticum* with different NH₄⁺/NO₃⁻ treatments

3 讨论

3.1 不同铵硝对比对绿狐尾藻生长特性的影响

相对生物量、相对茎高和根长分别从整体、挺水部分和沉水部分反映了植株的生长情况,具有一定的代表性。绿狐尾藻的相对生物量随培养时间的增加而逐渐增加,CK 和 N_{3:1} 处理的增加幅度较 N_{1:1} 处理大;相对茎高的趋势与相对生物量一致,3 个组别第 21 天的相对茎高之间有显著差异($P<0.05$),表现为 N_{3:1}>CK>N_{1:1};即铵硝配比小时,绿狐尾藻生长较慢,这可能跟绿狐尾藻喜铵有关(Zhou et

al,2017)。在茎中,N_{1:1} 的叶绿素 b(0.161 mg/g)和总叶绿素(0.248 mg/g)分别是 CK(0.122、0.203 mg/g)的 1.32 和 1.22 倍,差异显著($P<0.05$);而 N_{3:1} 叶绿素含量(0.060、0.116、0.176 mg/g)均低于 CK(0.081、0.122、0.203 mg/g),尤其是叶绿素 a 含量仅为 CK 的 74.2%,显著低于 CK ($P<0.05$) (图 5-b)。茎部叶绿素含量远低于叶片中,仅为叶片叶绿素含量的 13.3%~23.3%。

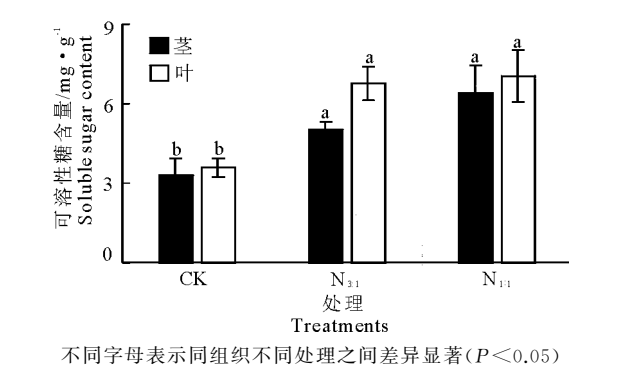


图 4 不同铵硝配比的绿狐尾藻可溶性糖含量

Different lowercases indicate significant differences of the same tissue between different treatments ($P<0.05$)

Fig.4 Soluble sugar content of *M. aquaticum* with different NH₄⁺/NO₃⁻ treatments

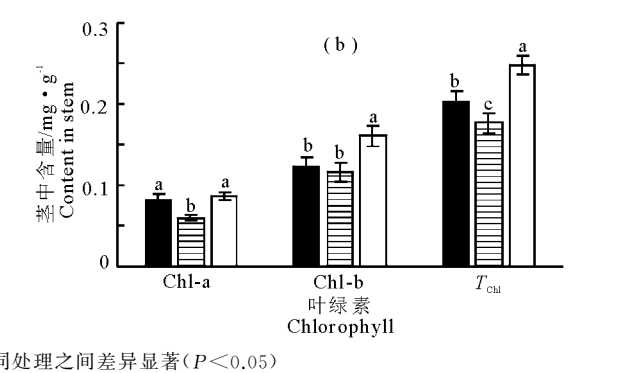


图 5 不同铵硝配比的绿狐尾藻叶绿素含量

Different lowercases indicate significant differences between different treatments for the same chlorophyll category ($P<0.05$)

Fig.5 Chlorophyll content of *M. aquaticum* with different NH₄⁺/NO₃⁻ treatments

al,2017)。在铵硝配比较大的水体中,快速增长的生物量有利于绿狐尾藻植株富集更多的氮和磷。然而,与相对生物量和相对茎高逐渐增加的趋势不同,3 个处理的根长在培养后期较前期并没有显著增长,可能是由于培养后期根系吸收的营养更多地输送至地上部,供应地上部的快速生长(许明等,2010),导致根系增长缓慢甚至停止增长;这也提高了绿狐尾藻作为生态湿地先锋植物饲料化的可行性(余红兵等,2013)。

3.2 不同铵硝对比下绿狐尾藻氮磷含量的变化

氮对叶片进行光合作用至关重要(吕鹏等,

2013),绿狐尾藻主要以断枝进行无性繁殖(李裕元等,2018),而磷作为三磷酸腺苷的重要组分,可以为茎的无性繁殖提供更多的能量,这可能是绿狐尾藻从水体中吸收的氮更多地富集在叶中,而磷更多地富集在茎中的原因。茎部的氮和磷含量以及叶片中的氮含量在生长后期有略微的下降,这可能是因为植株后期相对生物量大,所以体内的营养元素存在一定的“稀释效应”(李海玲等,2006)。除了第14天的茎部氮含量 $N_{3:1}$ 显著高于 $N_{1:1}$,其他时间各处理之间都没有显著差异,说明不同的氮源对植株体内氮含量的影响不大,这一结果有可能与实验进行的季节有关。樊卫国和葛会敏(2015)的实验也出现了类似的结果,在春季和夏季,单施硝态氮与混施铵态氮和硝态氮的枳砧组荷尔脐橙幼树根系对 NO_3^- 的最大吸收速率 ($I_{\max}$) 均无显著差异。本次实验后期, $N_{1:1}$ 的叶片磷含量显著高于纯铵处理,在一定程度上说明铵硝混合比单一铵态氮源更利于植株对水体中磷的吸收和积累;氮素供应形态对水稻磷吸收的影响实验结果也表明,与单一的铵或硝营养相比,铵硝混合营养可增加吸收的磷从根系向地上部的输送(李宝珍等,2008);该结果为绿狐尾藻如何更高效地去除污染水体中的磷提供一定的理论依据。叶片中的氮含量高达 $50.38 \sim 58.82 \text{ mg/g}$,茎中磷含量高达 $8.44 \sim 9.88 \text{ mg/g}$,表明绿狐尾藻在不同的铵硝配比下均有较高的氮磷含量;以此推断绿狐尾藻对不同来源的养殖废水均有较高的净化效率,是构建人工湿地净化养殖废水的理想材料。

3.3 不同铵硝比对绿狐尾藻生理特征的影响

随着铵硝配比降低,植株体内的含水量显著降低。可能是由于绿狐尾藻优先吸收铵离子,当水体中铵浓度较高时,根系吸收铵的同时,根细胞的渗透压升高,进一步促进了对水分的吸收,CK 和 $N_{3:1}$ 处理的水分含量较高,也很好地解释了其相对生物量较 $N_{1:1}$ 处理大的原因。可溶性糖是植物体内碳水化合物运输和利用的主要形式(潘庆民等,2002), $N_{1:1}$ 和 $N_{3:1}$ 处理的可溶性糖含量显著高于 CK,由此可见水体中存在一定的硝态氮源有助于绿狐尾藻提高植株可溶性糖含量,通过调节体内细胞渗透压,进而能够提高绿狐尾藻抵御不良环境的能力。 $N_{1:1}$ 的叶片叶绿素含量显著高于 $N_{3:1}$ 和 CK, $N_{1:1}$ 的茎部叶绿素含量也高于 CK 和 $N_{3:1}$ 。肖凯等(2000)对小麦的研究结果与本实验结果一致,表明净光合速率为 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 混合营养高于单一供 NO_3^--N 或单一供 NH_4^+-N ;张福锁等(1995)研究

发现,植物仅以铵态氮作为氮源时,铵离子容易扩散穿过生物膜,影响质子驱动势的形成,破坏膜结构,诱发氧化磷酸化和光合磷酸化与电子传递解偶联,从而抑制 CO_2 暗固定,降低光合作用效率,引发植物体内代谢失调现象。本研究结果表明,水体中存在适量的 NO_3^--N 提高了绿狐尾藻叶绿素含量,能够促进光合作用,并且合成较多的可溶性糖,为植物体提供生长发育所必需的物质和能量。

综上所述,水体中适量的硝态氮存在,不仅不会影响绿狐尾藻的生长发育,反而促进了根系的发育,能够提高绿狐尾藻植株体内叶绿素含量,促进光合作用,并且合成较多的可溶性糖,供给植株细胞进行新陈代谢;而且可以提高绿狐尾藻吸收水体中磷的效率,以达到更高效地净化富营养化水体的目的。

参考文献

- 鲍士旦,2000. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社:263-268.
- 樊卫国,葛会敏,2015. 不同形态及配比的氮肥对枳砧脐橙幼树生长及氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学,48(13):2666-2675.
- 李宝珍,王松伟,冯慧敏,等,2008. 氮素供应形态对水稻根系形态和磷吸收的影响[J]. 中国水稻科学,22(5):665-668.
- 李海玲,王麒,方升佐,2006. 两个杨树无性系中大量元素含量的年变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),30(1):49-52.
- 李裕元,李希,吴金水,等,2018. 绿狐尾藻的区域适应性生态竞争力研究[J]. 农业环境科学学报,37(10):2252-2261.
- 刘锋,罗沛,刘新亮,等,2018. 绿狐尾藻生态湿地处理污染水体的研究评述[J]. 农业现代化研究,39(6):1020-1029.
- 刘少博,冉彬,曾冠军,等,2017. 高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征[J]. 环境科学,38(9):3731-3737.
- 卢颖林,李庆余,徐新娟,等,2010. 不同形态氮素对番茄幼苗体内营养元素含量的影响[J]. 中国农学通报,26(21):122-130.
- 陆景陵,2003. 植物营养学[M]. 2版. 北京:中国农业大学出版社:25-34.
- 陆松柳,张辰,徐俊伟,2011. 植物根系分泌物分析及对湿地微生物群落的影响研究[J]. 生态环境学报,20(4):676-680.
- 吕鹏,张吉旺,刘伟,等,2013. 施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响[J]. 生态学报,33(2):576-585.
- 潘庆民,韩兴国,白永飞,等,2002. 植物非结构性贮藏碳

- 水化合物的生理生态学研究进展[J]. 植物学通报, 19(1): 30-38.
- 相晨, 卢剑波, 刘芳, 等, 2016. 水生植物对富营养化水体净化效果的初步研究[J]. 环境科学导论, 35(5): 32-37.
- 肖凯, 张树华, 邹定辉, 等, 2000. 不同形态氮素营养对小麦光合特性的影响[J]. 作物学报, 26(1): 53-58.
- 许明, 贾德涛, 陈温福, 2010. 北方粳型超级稻根系生长与地上部分生物量的变化[J]. 华北农学报, 25(3): 140-144.
- 余红兵, 张树楠, 肖润林, 等, 2013. 沟渠水生植物资源化利用研究[J]. 草业学报, 22(6): 143-149.
- 张福锁, 樊小林, 李晓林, 1995. 土壤与植物营养研究新动态:第2卷[M]. 北京: 中国农业出版社: 42-75.
- 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等, 2015. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 36(12): 4516-4522.
- 张振清, 1985. 植物生理学实验手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社: 134-138.
- 郑足红, 胡超, 王华伟, 等, 2018. 3种水生植物对富营养化水质的净化性能比较[J]. 环境污染与防治, 40(10): 1147-1151.
- 朱杰, 黄涛, 范兴建, 等, 2009. 厌氧氨氧化工艺处理高氨氮养殖废水研究[J]. 环境科学, 29(5): 1442-1448.
- Bezbaruah A N, Zhang T C, 2005. Quantification of oxygen release by bulrush (*Scirpus validus*) roots in a constructed treatment wetland[J]. Biotechnology and Bioengineering, 89: 308-318.
- Dhote S, Dixit S, 2009. Water quality improvement through macrophytes-a review [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 152: 149-153.
- Huang J, Wang S H, Yan L, et al, 2010. Plant photosynthesis and its influence on removal efficiencies in constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 36(8): 1037-1043.
- Li X, Zhang M M, Liu F, et al, 2018. Seasonality distribution of the abundance and activity of nitrification and denitrification microorganisms in sediments of surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum elatinoides* during swine wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 248: 89-97.
- Liu F, Zhang S N, Wang Y, et al, 2016. Nitrogen removal and mass balance in newly-formed *Myriophyllum aquaticum* mesocosm during a single 28-day incubation with swine wastewater treatment[J]. Journal of Environment Management, 166: 596-604.
- Liu F, Zhang S N, Luo P, et al, 2018. Purification and reuse of non-point source wastewater via *Myriophyllum*-based integrative biotechnology: A review[J]. Bioresource Technology, 248: 3-11.
- Sartory D P, Grobbelaar J U, 1984. Extraction of chlorophyll a from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis[J]. Hydrobiologia, 114: 177-187.
- Shelef O, Gross A, Rachmilevitch S, 2013. Role of plants in a constructed wetland: current and new perspectives[J]. Water, 5(2): 405-419.
- Zhang S N, Xiao R L, Liu F, et al, 2016. Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms[J]. Ecological Engineering, 97: 363-369.
- Zhang S N, Liu F, Xiao R L, et al, 2017. Nitrogen removal in *Myriophyllum aquaticum* wetland microcosms for swine wastewater treatment: ¹⁵N-labelled nitrogen mass balance analysis[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97(2): 505-511.
- Zhou Q Y, Gao J Q, Zhang R M, et al, 2017. Ammonia stress on nitrogen metabolism in tolerant aquatic plant *Myriophyllum aquaticum*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 143: 102-110.

(责任编辑 万月华)

Physiological Response of *Myriophyllum aquaticum* Exposed to Different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ Ratios

ZHANG Ying^{1,2,3}, LI Bao-zhen^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, LUO Pei^{1,2}, XIAO Run-lin^{1,2}, WU Jin-shui^{1,2,4}

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125,P.R.China;
2.Changsha Research Station for Agricultural and Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125,P.R.China;
3.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128,P.R.China;
4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100004,P.R.China)

Abstract: With the development of artificial wetland technology in recent years, the macrophyte *Myriophyllum aquaticum* has attracted attention for treatment of swine wastewater. The influence of nitrate (NO_3^-) levels on the growth and physiological characteristics of *M. aquaticum* under conditions of high ammonium (NH_4^+) was explored, using a 21 day hydroponics experiment to study the response of *M. aquaticum* to different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios:100% NH_4^+ (control), $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- = 3:1$ and $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- = 1:1$. On day 21, the relative biomass (13.17 g) and relative stem height (35.31cm) of *M. aquaticum* in the 1:1 treatment were significantly lower than those in the 3:1 (19.59 g, 41.78 cm) treatment and control (17.82 g, 38.82 cm) ($P<0.05$). The nitrogen content of leaves (50.38 – 58.82 mg/g) was significantly higher than the stem content (26.96 – 35.42 mg/g), while the phosphorus content of leaves (5.17 – 7.38 mg/g) was significantly lower than the stem content (8.44 – 9.88 mg/g) ($P<0.05$). On Day 21, the phosphorus content of leaves differed significantly among treatments ($P<0.05$), in the following order: $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- = 1/1$ (7.38 mg/g) $>$ $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- = 3/1$ (7.06 mg/g) $>$ control (6.76 mg/g). The soluble sugar content of stems (6.43, 5.04 mg/g) and leaves (7.03, 6.75 mg/g) in both treatments were significantly higher than in the control (3.27, 3.58 mg/g) ($P<0.05$). The chlorophyll content of stems and leaves were significantly higher in the 1:1 treatment than either the 3:1 treatment or control ($P<0.05$). Wastewater containing little or no nitrate benefits the growth of *M. aquaticum* stem height and biomass. When nitrate concentration in water was relatively high, the plant contents of chlorophyll and soluble sugar were high, and the uptake capacity of phosphorus was strong. In summary, *M. aquaticum* grows well and maintains strong nitrogen and phosphorus absorption capacity in waters with varying ratios of $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$. These results provide theoretical guidance supporting the use of *M. aquaticum* for purification of swine wastewater from different sources.

Key words: $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio; *Myriophyllum aquaticum*; plant growth characteristics; physiological response