植物营养与肥料学报 2014,20(1):213-220
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0124

水体氮浓度对狐尾藻和金鱼藻片段萌发及生长的影响

李红丽[1], 王永阳[1], 李 玉[1], 智颖飙[2*], 张德建[3], 吴 薇[1], 李 欢[1], 高 娜[4]
(1 北京林业大学自然保护区学院,北京 100083; 2 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021;
3 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021;4 国家林业局速生丰产用材林基地建设工程管理办公室, 北京 100714)

摘要: 为了厘清水体氮浓度对沉水植物片段萌发及生长的影响,通过模拟控制试验,设计了水体总氮浓度分别为0(CK)、0.5 mg/L(N1)、2 mg/L(N2)、8 mg/L(N3)和12 mg/L(N4)共5个处理,研究了水体不同氮浓度条件下狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)片段(3节)萌芽数、萌发位置、芽长和生物量的差异。结果表明:水体氮浓度对不同沉水植物片段萌发的影响存在差异,较高的水体氮浓度不利于狐尾藻片断萌发,而对金鱼藻片段却有一定程度的促进;氮浓度处理促进了狐尾藻顶端优势,却抑制了金鱼藻的顶端优势。狐尾藻以0.5 mg/L处理的芽长较长,生物量以2 mg/L处理最大;而金鱼藻以8 mg/L处理芽长最长,生物量以2 mg/L处理最大。由此可见,不同沉水植物对水体氮适应性存在差异,水体氮浓度较低时,沉水植物断枝可以进行萌发和生长,而当氮浓度超过2 mg/L时,对沉水植物断枝萌发及生长反而有抑制作用;金鱼藻片段比狐尾藻对水体氮浓度的耐受性强。

关键词: 氮浓度; 金鱼藻; 狐尾藻; 断枝; 生物量
中图分类号: S273.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0213-08

Effects of nitrogen concentration in water on the germination and growth of *Myriophyllum spicatum* and *Ceratophyllum demersum* fragments

LI Hong-li[1], WANG Yong-yang[1], LI Yu[1], ZHI Ying-biao[2*], ZHANG De-jian[3], WU Wei[1], LI Huan[1], GAO Na[4]
(*1 College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 College of Environment and Resources Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 3 College of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 4 Plantation Management Office, State Forestry Administration, Beijing 100714, China*)

Abstract: Hydrophyte especially the submerged macrophytes are important primary producer and main contributor to the subprime productivity in the water ecosystem. Improper agriculture and industry practices have led to deteriorated water quality, and eutrophication is one of the most pressing problems. The quantity of many kinds of hydrophytes, especially submerged macrophytes, have declined and even disappeared in the world as a result. The submerged macrophytes segments keep germinating when eaten by fish and cut by boats. There is not enough information about the effect of water nitrogen concentration on the germination and growth of the submerged macrophytes. In this experiment, the fragments with 3 nodes of *M. spicatum* and *C. demersum* were used, the bud number, location of bud and biomass were investigated under five nitrogen levels in water: 0 (CK), 0.5 mg/L (N1), 2 mg/L (N2), 8 mg/L (N3) and 12 mg/L (N4). The results indicate that the tolerance to high N level is different with different submerged macrophytes. The shoot length and biomass of *M. spicatum* were largest when the N concentration was 0.5 mg/L and 2 mg/L respectively, those of *C. demersum* were largest when the N

收稿日期: 2013-02-28 **接收日期:** 2013-07-01
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(YX2011-34); 内蒙古自然科学基金(2011MS0501); 内蒙古人才开发基金(2011RC1228); 内蒙古科技创新引导基金(20121604); 内蒙古创新人才团队(20130430)和鄂尔多斯市创新人才团队(20121205)项目资助。
作者简介: 李红丽(1980—), 女, 山东菏泽人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事湿地生态方面的研究。E-mail: lihongli327@163.com
* 通信作者 E-mail: zhiyb@imu.edu.cn

concentration was 8.0 mg/L and 2 mg/L respectively. The segment germination and growth of the submerged macrophytes would be restrained when the N concentration was higher than 2 mg/L.

Key words: nitrogen concentration; *Myriophyllum spicatum*; *Ceratophyllum demersum*; segments; biomass

水生植物尤其沉水植物是淡水湿地生态系统中重要的初级生产者,是水生态系统初级生产力和次级生产力的主要贡献者[1]。沉水植物能够吸收水体的氮磷等营养物质,对维护湖泊生态系统的结构和功能发挥了重要的价值[2]。然而,随着工农业生产的迅速发展,区域水环境质量日益恶化,水体富营养化已成为水环境质量下降最严重的问题之一[3],水体中总氮浓度的迅速增加是导致湖泊水体富营养化最重要的因素,过高氮浓度毒害是引起沉水植物衰退和消失的重要因素之一[4]。因此研究沉水植物对水体氮浓度的生长响应,对于认识沉水植物在富营养水体中的衰退机理以及指导沉水植物在湖泊沉水植被中的恢复具有重要的意义。

目前,水体氮对沉水植物的毒理作用研究受到广泛关注[2,5-9]。已有的研究表明,沉积物中高含量铵态氮能引起狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)生物量降低,根系中过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性升高,叶片和根系膜脂过氧化程度增加,且这种毒害作用随着其浓度越高,其生理反应越强[5]。随着铵态氮浓度的增加和胁迫时间的延长,金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)的相对生长率、植物体内碳氮比(C/N)和叶绿素含量逐步降低,光合作用受到抑制[4]。金鱼藻对环境中铵态氮含量比较敏感,其忍受力与环境中的 pH 相关[10-11]。沉水植物能够吸收水体中的氮元素,对净化水体有一定作用[12],这种净化能力取决于沉水植物的种类[13]、密度[14]、生长特性[15]及盖度[16]。中密度的狐尾藻和金鱼藻可降低水体的氮、磷含量,而高密度却有一定的反弹[14]。光照的强弱和水位的高低也影响着对铵态氮的吸收[17],光照条件下狐尾藻和苦草对铵态氮吸收能力强于黑暗环境[2]。而水体不同氮浓度对沉水植物断枝生长的影响的研究却相对较少。

无性繁殖是沉水植物重要的繁殖方式,由于沉水植物经常受到船舶机械力作用和水生生物采食而形成大小不一的断枝,而利用断枝来完成其繁殖和扩散过程是水生植物响应干扰环境的重要对策[18-19]。断枝可通过定植再产生新的植株,进而维持种群的更新,狐尾藻产生断枝受底泥营养及密度的影响[20]。目前对沉水植物断枝的研究主要倾向和集中于断枝长度[21]、位置、节数[22]及同属种[18,23]对种群更新的影响[24]。长枝比短枝具有更强的再生能力[22],对没有顶芽的黑藻(*Hydrilla verticillata*),5 节是形成新苗的最短节数[25]。随着断枝长度的增加,不定根和芽的发生时间缩短,幼苗成活率增加[24,26]。氮水平对沉水植物生长和生理产生了一定的影响,但关于不同水体氮浓度对沉水植物片段断枝的萌发及生长影响尚未见报道。本文选择两种常见沉水植物,以金鱼藻和狐尾藻为研究对象,分析不同氮浓度处理下其萌发率、萌发位置、芽长及生物量的动态变化,进而分析水体不同氮浓度条件下沉水植物片段萌发及生长的特征。该研究对于认识沉水植物衰退机理、建立沉水植物耐富营养化的综合评价指标,进而对沉水植物的恢复和水体生态系统的重建提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

狐尾藻是小二仙草科(*Haloragidaceae*)多年生沉水植物[24],常与金鱼藻、菹草等形成各种类型的水生植物群落。由于狐尾藻分布广泛,生长迅速,再生能力强,它也常用于退化湖泊的植被恢复[5]。另外,金鱼藻是典型的喜氮植物,代表了此类沉水植物在富营养化水体的生长状况。本试验选择浅水湖泊中常见的两种沉水植物狐尾藻与金鱼藻作为试验材料。

1.2 试验设计

2011 年 6 月 11 日,从北京圆明园用箱体选取一定数量的金鱼藻和狐尾藻片段,于北京林业大学科技日光温室内进行培养。金鱼藻和狐尾藻生长稳定后,截取生长良好且长度 5 cm 左右、节数均为 3 节的金鱼藻和狐尾藻片断用于试验。

根据淡水湖泊水体富营养化氮素营养梯度的标准,用硝酸铵分别配置不同富营养化梯度的溶液,共有对照和 4 个水体氮处理,分别为: CK, 0 (贫营养);N1, 0.5 mg/L (中营养);N2, 2 mg/L (中营养);N3, 8 mg/L (富营养);N4, 12 mg/L (富营养)。试验在直径 6.5 cm、深 17.0 cm 的容器内进行,每个处理重复 30 次。

试验于2011 年6 月12 日~7 月11 日在北京林

业大学科技日光温室内进行。试验期间，每星期换营养液 1 次，以保证其溶液浓度变化较小。微量元素用沉水植物需要的营养液配制。每周监测植株片段的萌发数、萌发位置，计算萌芽率；同时测量芽的长度。试验结束后，将每段植株完整取出，测定相关指标后，装入信封，置于电热鼓风干燥箱 60℃烘干 72 小时后称重。

1.3　数据统计分析

数据用 EXCEL 软件进行记录并分类处理，用 SPSS 18.0 中 One-Way ANOVA 及 Three-way ANOVA 分析，用 Duncan 法分析处理间的显著性，并检测其数据方差齐性。分析结果用 Sigma plot 11.0 作图。

2　结果与分析

2.1　不同水体氮浓度下沉水植物片段萌发数的动态变化

在不同水体氮浓度处理下，狐尾藻和金鱼藻萌发数随着时间变化呈现比较一致的变化规律，在第一周内上升，之后下降（图 1）。

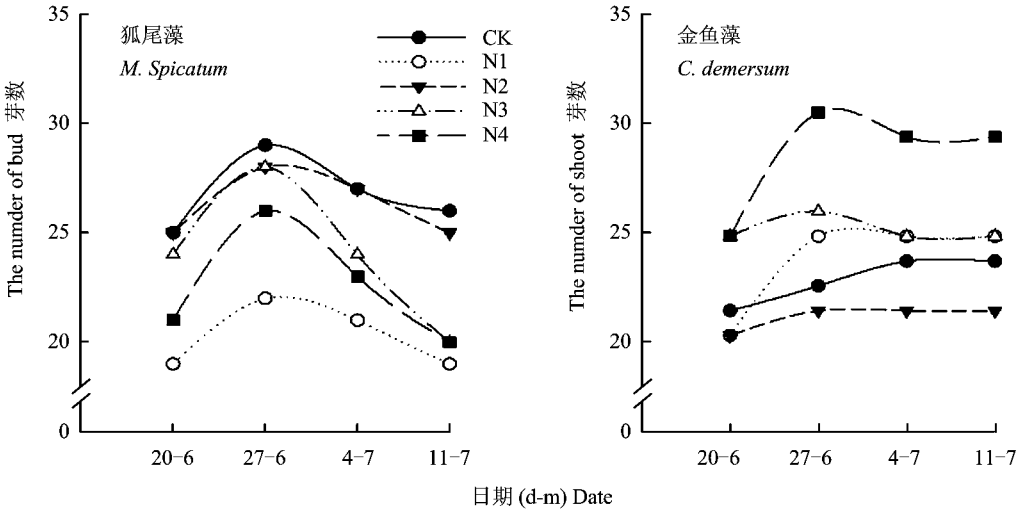

图 1　不同水体氮浓度下两种沉水植物萌芽数的动态变化

Fig. 1　The number of bud for sprouted in the two submerged macrophytes under different water N content

狐尾藻的萌发数在无氮时（CK）最多，在 N1（0.5 mg/L）处理最少，水体氮浓度从 N2 增至 N4，萌芽数呈减少趋势。金鱼藻的萌芽数在处理两周后，以 N4（12 mg/L）处理最多，N2（2 mg/L）处理最少。综合分析表明，不同沉水植物物种对氮处理的响应有一定差异，当氮浓度为 2 mg/L 时，狐尾藻的萌发数较大，而金鱼藻的萌发数最小。当氮浓度大于 2 mg/L 时，狐尾藻随氮浓度升高其萌发数逐渐降低，而金鱼藻随氮浓度升高，萌发数有上升趋势（图 1）。

2.2　不同水体氮浓度下沉水植物片段两侧及中间萌芽节位萌发率的动态变化

由图 2 可知，在不同氮浓度处理下，N3 处理狐尾藻两侧萌芽节位萌发率随时间推移先下降，后趋于稳定，而 N1 处理则表现为先稳定，接着升高后稳定。在同一时间点，狐尾藻在 N4 处理下两侧萌芽率最大，随着时间的推移，其两侧萌发率均大于对照，而中间位置芽的萌发率却呈现相反趋势，表明氮处理能够一定程度上促进顶端优势。

除了 CK 和 N2（2 mg/L）处理外，其它水体氮处理下金鱼藻片段两侧萌发率第 2 周后趋于稳定。相同时间点，对照处理两侧萌芽数高于其它氮处理，其中以 N2（2 mg/L）氮浓度处理的金鱼藻的两侧萌芽率最低，其他三组的金鱼藻的两侧萌芽率大致相同。而中间位置芽的萌发率呈现相反的趋势，由此可见氮处理对金鱼藻两侧萌发有一定的抑制作用，其中以氮浓度为 2 mg/L 抑制作用最强（图 2）。

2.3　不同水体氮浓度处理下沉水植物片段芽长的动态变化

物种和萌发时间对沉水植物芽长具有显著影响，而氮浓度对沉水植物芽长影响却不显著，且时间和氮浓度的交互作用对其影响不显著（表 1）。

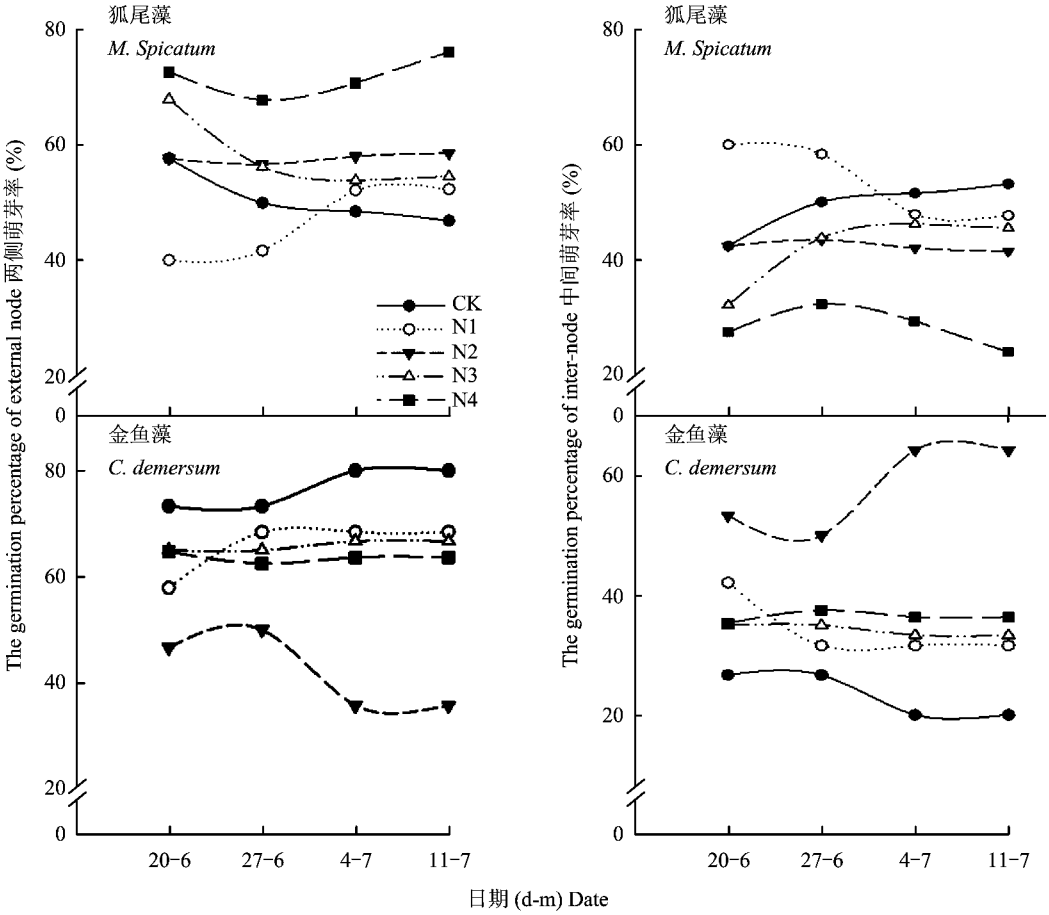

图2 不同水体氮浓度处理下两种沉水植物两侧和中间萌芽率

Fig. 2 The germination percentage of external nodes and inter-nodes for the two submerged plants under different water N content

表1 沉水植物物种、时间及水体氮浓度对芽长影响的 ANOVA 分析

Table 1 Three-Way ANOVA analysis of the effect of species, time and nitrogen content on the sprout lengh of two submerged macrophytes

处理 Treatment	*df*	*F*	*P*
物种 Species	1	21.31	< 0.001
氮浓度 Nitrogen level	4	0.60	0.662
时间 Time	2	37.35	< 0.001
物种×氮浓度 Species × Nitrogen level	4	1.90	0.109
物种×时间 Species ×Time	2	2.55	0.079
时间×氮浓度 Time × Nitrogen level	8	0.91	0.51
物种×氮浓度×时间 Species × Nitrogen level × Time	8	0.71	0.682

不同时间及氮处理下的狐尾藻芽长有一定差异。在初始阶段,不同水体氮处理下狐尾藻芽长基本一致;一周后以 CK 处理狐尾藻的芽长最长;而在生长后期,N1 (0.5 mg/L)处理的狐尾藻的芽长数值最大(图3)。处理一周时,N2 (2 mg/L)氮浓度处理的金鱼藻的芽长高于其它理,而在处理的后第二周、第三周时,N3(8 mg/L)氮浓度处理的金鱼藻的芽长显著高于 CK,N1 和 N4 处理,而与 N2 处理无

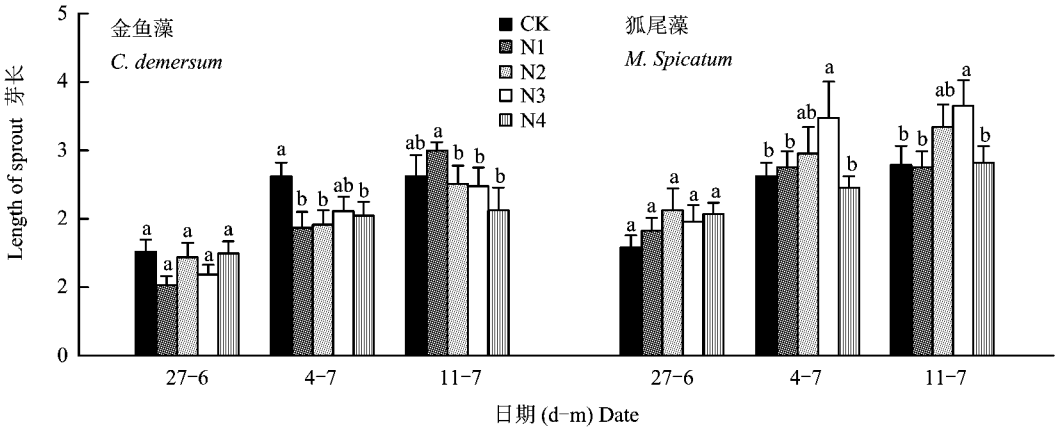

图 3　不同水体氮浓度下两种沉水植物的芽长变化

Fig. 3　The sprout length of the two submerged macrophytes under different water N content

[注(Note)：柱上不同字母表示同一时间点处理间在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars mean significant at the 0.05 level among different treatments at the same sampling time.]

显著差异(图 3)。

不同水体氮处理对不同沉水植物影响不同，较低水体氮浓度 N1 (0.5 mg/L)对狐尾藻片段的萌发生长有促进作用，而高浓度则对其有一定的抑制作用。而中浓度对金鱼藻片段的萌发和生长具有促进作用。

2.4　不同水体氮浓度处理对沉水植物片段生物量的影响

不同水体氮处理间狐尾藻生物量无显著差异($P > 0.05$)，以 N2 (2 mg/L)处理狐尾藻生物量最大，以 N1 (0.5 mg/L) 处理其生物量最小。而不同氮浓度间金鱼藻生物量差异显著($P < 0.05$)，N2 (2 mg/L)处理金鱼藻的生物量显著高于 N3 (8 mg/L)和 N4 (12 mg/L)，高氮浓度对金鱼藻的生长有一定的抑制作用(图 4)。

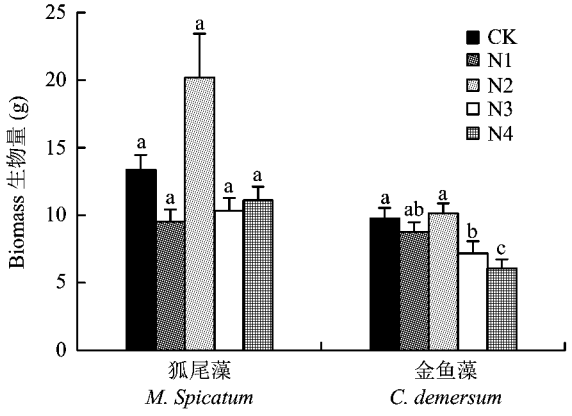

图 4　不同水体氮浓度下两种沉水植物的生物量

Fig. 4　The biomass of two submerged macrophytes under different water N content

[注(Note)：柱上不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different letters above the bars mean significant at the 0.05 level among treatments.]

3　讨论

氮是植物生长过程中必需的营养元素，参与植物生命过程中的各种生理代谢活动，是植物体内许多重要有机化合物如蛋白质、叶绿素、核酸等的组成成分[27]。水体富营养化后，沉水植物生长的环境一般含氮量比较高[28]，水体中较高的氮、磷对沉水植物而言，与盐胁迫、环境污染物胁迫一样是一种逆境胁迫，影响其正常生理活动[29]，进而影响其水生植物的生长。不同沉水植物对氮引起的水体富营养化忍受力存在差异。如马来眼子菜对氮的忍受能力强于黑藻和苦草[30]。槐叶萍可以忍受较高氮浓度的环境，而且其繁殖能力较强，常用作去除水体氮营养的材料，但是当氮浓度高于 5 mmol/L 时，其叶片变小，生物量急剧降低[31]。水体中氮含量的增加是导致长江口岸沉水植物苦草消失的重要原因之一，当水体中的铵态氮含量大于 0.56 mg/L，苦草基本无法生存[32]。不同沉水植物对由氮而引起的富营养化的反应机理已经有一些研究[28]，认为沉水植物对水体富营养化的敏感性主要受水体透明度下降引起的光衰减(包括与藻类的光竞争)和植物生长型的影响，而不受水体中氮、磷浓度变化所直接引起的生理反应的影响[28]。光照条件下，狐尾藻对水体中氮的吸收能力高于黑暗环境[2]。本研究中，水体氮浓度大于 2 mg/L 不利于狐尾藻片断萌发，而对

金鱼藻片段却有一定程度的促进;一定的氮浓度处理促进了狐尾藻顶端优势,对金鱼藻却有顶端优势抑制作用,进而影响了其芽长和生物量,表明沉水植物狐尾藻和金鱼藻对水体氮浓度响应存在差异。

沉水植物对于水体氮浓度响应存在差异的原因,可能与其在不同水体氮浓度下的生理活动有关。在本研究中,狐尾藻以 N 0.5 mg/L 处理的芽长较长,生物量以 2 mg/L 处理最大;而金鱼藻芽长以 8 mg/L 处理下的芽长最长,而以 2 mg/L 处理下生物量最大,这些均表明,适宜氮浓度处理下沉水植物片段可以进行萌发,生长,而氮浓度超过 2 mg/L 时,对沉水植物断枝萌发及生长反而有抑制作用。关于狐尾藻的研究也表明,狐尾藻在中氮浓度(7.0 mg/L)时生物量最大,顶端组织内的可溶性糖和总酚含量变高,以抵御氮不足或过高带来的养分胁迫[27]。底泥中较高的铵态氮含量条件下,狐尾藻叶片和根系内丙二醛(MDA)含量升高,导致其生物量显著降低[9],且浓度越高,其生理反应越强[5,33]。金鱼藻对环境中的铵氮比较敏感,对硝态氮有一定的耐受力[6],当硝态氮浓度为 20 ~ 60 mg/L 时,会促进硝态氮的吸收和转化,而当硝态氮浓度高于 60 mg/L 时,金鱼藻中的可溶性蛋白含量保持不变[8],随着氮浓度胁迫时间的延长,金鱼藻体内的碳氮比下降,叶绿素含量下降,光合作用减弱,相对生长率下降[4,7,34]。另外富营养化可以改变水体的 pH 值,由此改变金鱼藻对氮的生理响应[29],中性 pH 铵态氮胁迫下,金鱼藻组织内过氧化物酶 (POD) 活性、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、还原型谷胱甘肽(GHS)含量升高,但是在高 pH 铵态氮胁迫下,金鱼藻组织内 SOD 活性、POD 活性、GHS 含量下降,而过氧化氢酶(CAT)活性、抗坏血酸(ASA)和丙二醛(MDA)含量在两个 pH 环境中随铵态氮处理浓度的增加而不断升高[3,10,35]。这些研究表明两种沉水植物对水体氮忍受力的差异可能主要与环境胁迫造成的酶活性不同有关。

沉水植物的茎受到各种干扰而形成长短不一或者顶芽有无的断枝,断枝通过定植和再生进而影响种群的更新[18,36]。以往主要侧重于研究断枝的长度、节数,以及投递的方式对断枝的定植和再生的影响[19,22,24-26,37-39]。目前我国大多数大中型湖泊和水库的总氮含量较高,势必影响沉水植物断枝种群的更新,进而影响沉水植物的恢复,因此本研究将对水生生态系统中利用断枝来进行沉水植物的恢复提供一定的指导作用。除去氮浓度,水体中其它环境因素如光照、温度、底质对沉水植物断枝生长繁殖有一定的影响[11],本研究只考虑了氮元素对沉水植物生长繁殖的影响,没有结合其它环境因素,因此有关沉水植物断枝定居及扩散仍需要进一步深入研究。

4 结论

1)水体氮浓度大于 2 mg/L 不利于狐尾藻片断萌发,而对金鱼藻片段却有一定程度的促进;氮浓度处理促进了狐尾藻顶端优势,却抑制了金鱼藻的顶端优势。

2)狐尾藻以水体氮浓度为 0.5 mg/L 处理的芽长较长,生物量以 2 mg/L 处理最大;而金鱼藻以 8 mg/L 处理下芽长最长,生物量以 2 mg/L 处理下最大。

3)不同沉水植物对水体氮适应性存在差异,水体氮浓度较低时,沉水植物断枝可以进行萌发和生长,而当氮浓度超过 2 mg/L 时,对沉水植物断枝萌发及生长反而有抑制作用;金鱼藻片段比狐尾藻对水体氮浓度的耐受性强,可以优先选择为富营养化水体环境沉水植物恢复的材料。

参 考 文 献:

[1] 杨永清. 水位波动对水生植物生长影响的实验生态学研究[D]. 武汉: 武汉大学硕士学位论文, 2003.
Yang Y Q. Effects of watet level fluctuation on the growth of aquatic plants(an experimental ecological study)[D]. Wuhan: Ms thesis of Wuhan University, 2003.

[2] 钟爱文, 曹特, 张萌, 等. 光照和黑暗条件下苦草(*Vallisneria natans*)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)对铵态氮的吸收[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 289-294.
Zhong A W, Cao T, Zhang M *et al*. Uptake of ammonium by *Vallisneria natans* and *Myriophyllum spicatum* under light and dark regimes[J]. J. Lake Sci., 2013, 25(2): 289-294.

[3] 刘燕. 氮对沉水植物狐尾藻的生理特征及与沉积物氮行为的影响[D]. 北京: 首都师范大学硕士论文, 2009.
Liu Y. The effect of physiological response and nitrogen acts for sediment in the *Myriophyllum spicatum* L. on nitrogen nutrition [D]. Beijing: Ms thesis of Beijing Capital Normal University, 2009.

[4] 高镜清, 燕启社, 黄五星, 等. 富营养化水体中铵态氮对金鱼藻生长的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(5): 611-616.
Gao J Q, Yan Q S, Huang W X *et al*. Effects of ammonium on growth of *Ceratophyllum demersum* in eutrophic water[J]. Resour. Environ. Yangtze Basin, 2011, 20(5): 611-616.

[5] 焦立新, 王圣瑞, 金相灿. 穗花狐尾藻对铵态氮的生理响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2283-2288.

Jiao L X, Wang S R, Jin X C. Physiological responses of *Myriophyllum spicatum* to ammonium nitrogen[J]. Chin. J. App. Ecol., 2009, 20(9): 2283-2288.

[6] 李运祥，刘淑娟. 不同氮素营养水平下金鱼藻的生理响应[J]. 泰山学院学报，2009，31(6)：103-107.
Li Y X, Liu S J. Physiological responses of *Ceratophyllum demersum* under different concentrations of total nitrogen[J]. J. Taishan Coll, 2009, 31(6): 103-107.

[7] 樊英鑫，何开跃，袁丁，等. 尿素态氮对金鱼藻生长与生理特性的影响[J]. 河北北方学院学报(自然科学版)，2009，25(6)：33-37.
Fan Y X, He K Y, Yuan D *et al*. Effects of urea-nitrogen on growth and physiological properties of *Ceratophyllum demersum* [J]. J. Hebei North Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2009, 25(6): 33-37.

[8] 李靖，敖新宇，李宁云，等. 铵氮和硝氮胁迫下金鱼藻对氮素的利用[J]. 江西农业大学学报，2012，34(2)：409-413.
Li J, Ao X Y, Li N Y *et al*. Nitrogen usage of *Ceratophyllum demersum* under ammonia nitrogen and nitrate nitrogen stress[J]. Acta Agric. Univ., Jiangxiensis., 2012, 34(2): 409-413.

[9] 焦立新，王圣瑞，金相灿. 外源 NH_4^+ 对穗花狐尾藻根系形态和养分吸收的影响[J]. 生态学报，2010，30(7)：1817-1824.
Jiao L X, Wang S R, Jin X C. Effects of ammonium application on root morphology and nutrition absorption of *Myriophyllum spicatum*[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(7): 1817-1824.

[10] 高镜清，黄五星，黄宇，等. 铵态氮胁迫下金鱼藻的过氧化损伤和抗氧化能力[J]. 武汉大学学报(理学版)，2010，56(5)：590-596.
Gao J Q, Huang W X, Huang Y *et al*. NH_4^+-N stress on peroxidation damage and antioxidative capability of *Ceratophyiium demersum*[J]. J. Wuhan Univ. (Sci, Ed.), 2010, 56(5): 590-596.

[11] 范媛媛. 富营养水体中氮、磷对沉水植物生长和生理影响的研究[D]. 武汉：华中师范大学硕士学位论文，2007.
Fan Y Y. The influence of N P on growth and physilogy of submerged macrophytes in eutrophic waters[D]. Wuhan: Ms thesis of Central China Normal University, 2007

[12] Weragoda S K, Tanaka N, Jinadasa K *et al*. Impact of influent inorganic nitrogen on nitrate removal efficiency of submerged plant microcosms[J]. Chem. Ecol., 2009, 25(3): 179-188.

[13] 金春华，陆开宏，胡智勇，等. 粉绿狐尾藻和凤眼莲对不同形态氮吸收动力学研究[J]. 水生生物学报，2011，35(1)：75-79.
Jin C H, Lu K H, H Z Y *et al*. Kinetics of ammonium and nitrate uptake by *Myriophyllum aquaticum* and *Eichhornia crassipes*[J]. Acta Hydro. Sin., 2011, 35(1): 75-79.

[14] 王瑜，刘录三，舒俭民，等. 穗花狐尾藻和金鱼藻对白洋淀水质影响的原位围隔试验[J]. 环境科学研究，2012，25(3)：270-275.
Wang Y, Liu L S, Shu J M *et al*. In situ enclosure study on the effect of different planting densities of *Myriophyllum spicatum* and *Ceratophyllum demersum* on water quality in Baiyangdian Lake [J]. Res. Environ. Sci., 2012, 25(3): 270-275.

[15] 苏倩，刘存歧，杨军，等. 小西淀穗花狐尾藻的生长特性与氮磷吸收规律研究[J]. 水生态学杂志，2012，33(6)：50-55.
Su Q, Liu C Q, Yang J *et al*. Growth characteristics and nitrogen and phosphorus accumulation of *Myriophyllum spicatum* in Xiaoxidian[J]. J. Hydro., 2012, 33(6): 50-55.

[16] Dai Y, Jia C, Liang W *et al*. Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage[J]. Ecol. Eng., 2012, 40: 113-116.

[17] 柏祥，陈开宁，任奎晓，等. 不同水深条件下狐尾藻生长对沉积物氮磷的影响[J]. 生态环境学报，2011，20(6-7)：1086-1091.
Bai X, Chen K N, Ren K X *et al*. Influence of *Myriophyllum spicatum* growth on nitrogen and phosphorus in sediment in different water depth[J]. Ecol. Environ. Sci., 2011, 20(6-7): 1086-1091.

[18] 周洁，王东，狐尾藻属狭域种和广布种断枝的生长与再生能力比较研究[J]. 水生生物学报，2012，36(2)：316-322.
Zhou J, Wang D. Survival strategies of stem fragments in narrow endemic and widespread plats of the aquatic genus *Myriophyllum* [J]. Acta Hydro. Sin., 2012, 36(2): 316-322.

[19] 崔心红，熊秉红，蒲云海，等. 5 种沉水植物无性繁殖和定居能力的比较研究[J]. 植物生态学报，2000，24(4)：502-505.
Cui X H, Xiong B H, Pu Y H *et al*. Comparative study of regeneration and colonization ability in five submersed macrophytes[J]. Acta Phytoecol. Sin., 2000, 24(4): 502-505.

[20] Xie D, Yu D. Size-related auto-fragment production and carbohydrate storage in auto-fragment of *Myriophyllum spicatum* L. in response to sediment nutrient and plant density[J]. Hydrobiologia, 2011, 658(1): 221-231.

[21] Jiang J H, An S Q, Zhou C F *et al*. Fragment propagation and colonization ability enhanced and varied at node level after escaping from apical dominance in submerged macrophytes[J]. J. Integr. Plant Biol., 2009, 51(3): 308-315.

[22] 王海宾，鲁静，刘贵华. 顶芽、节数和埋藏深度对六种沉水植物断枝再生能力的影响[J]. 湖泊科学，2011，23(1)：61-66.
Wang H B, Lu J, Liu G H. Effects of apical tip, node number and burial depth on fragment regeneration of six submerged plants [J]. J. Lake Sci., 2011, 23(1): 61-66.

[23] Riis T, Madsen T V, Sennels R S H. Regeneration, colonisation and growth rates of allofragments in four common stream plants [J]. Aquat. Bot., 2009, 90(2): 209-212.

[24] 高莹，余小敏，刘杰，等. 狐尾藻断枝上不定根与芽发生的初步研究[J]. 水生生物学报，2007，31(5)：726-730.
Gao Y, Yu X M, Liu J *et al*. Production of adventitious roots and buds on fragments of *Myriophyllum spicatum*[J]. Acta Hydro. Sin., 2007, 31(5): 726-730.

[25] 马剑敏，胡灵卫，胡倩如，等. 伊乐藻和黑藻断枝根和芽的发生及生长研究[J]. 水生生物学报，2010，34 (3)：525-532.
Ma J M, Hu L W, Hu Q R *et al*. Regeneration of fragments of *Elodea nuttalii* and *Hydrilla verticillata*[J]. Acta Hydro. Sin., 2010, 34 (3): 525-532.

[26] 袁妙淼，顾传燕，杨万年. 狐尾藻与黑藻断枝的不定根和新芽的形成[J]. 植物生理学通讯，2006，42(5)：885-887.
Yuan M M, Gu C Y, Yang W N. Study on formation of adventitious roots and sprouts from segments of two submersed macrophytes[J]. Plant Phy. Sid. Com., 2006, 42(5): 885-887.

[27] 葛芳杰，刘碧云，鲁志营，等. 不同氮、磷浓度对穗花狐尾藻生长及酚类物质含量的影响[J]. 环境科学学报，2012，33(2)：472-479.
Ge F J, Liu B Y, Lu Z Y. *et al*. Effects of different nitrogen and phosphorus levels on the growth and total phenolic contents of *Myriophyllum spicatum* [J]. Acta Sci. Circumst., 2012, 33 (2): 472-479.

[28] 金相灿，楚建周，王圣瑞. 水体氮浓度、形态对黑藻和狐尾藻光合特征的影响[J]. 应用与环境生物学报，2007，13 (2)：200-204.
Jin X C, Chu J Z, Wang S R. Effects of nitorgen concentration and form in water on photosynthetic characteristics of *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum*[J]. Chin. J. Appl. Environ. Bio., 2007, 13(2): 200-204.

[29] 樊英鑫，三种形态氮对金鱼藻生长与生理特性的影响[D]. 南京：南京林业大学硕士学位论文，2007.
Fan Y X. Effects of three nitrogen forms on the growth and physiological properties of *Ceratophyllum demersum* [D]. Nanjing: Ms thesis of Nanjing Forestry University 2007.

[30] 叶春，邹国燕，付子轼，等. 总氮浓度对3种沉水植物生长的影响[J]. 环境科学学报，2007，27(5)：739-746.
Ye C, Zou G Y, Fu Z S *et al*. Responses of three submersed macrophytes to total nitrogen supply[J]. Acta Sci. Circumst., 2007, 27(5): 739-746.

[31] Jampeetong A, Brix H. Effects of NH_4^+ concentration on growth, morphology and NH_4^+ uptake kinetics of *Salvinia natans* [J]. Ecol. Eng., 2009, 35(5): 695-702.

[32] Cao T, Xie P, Ni L *et al*. The role of NH_4^+ toxicity in the decline of the submersed macrophyte *Vallisneria natans* in lakes of the Yangtze River basin, China[J]. Mar. Freshwater Res., 2007, 58(6): 581-587.

[33] 金相灿，郭俊秀，许秋瑾，等. 不同质量浓度铵氮对轮叶黑藻和穗花狐尾藻抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境，2008，17(1)：1-5.
Jin X C, Guo J X, Xu Q J *et al*. Effects of different concentrations of NH_4^+ on antioxidant system of *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum spicatum* [J]. Ecol. Environ., 2008, 17(1): 1-5.

[34] Hyldgaard B, Sorrell B, Olesen B *et al*. Geographically distinct *Ceratophyllum demersum* populations differ in growth, photosynthetic responses and phenotypic plasticity to nitrogen availability[J]. Funct. Plant Biol., 2012, 39: 774-783.

[35] 熊汉锋，姚志煌. 不同氮磷营养对金鱼藻的生理影响[J]. 鄂州大学学报，2009，16 (2)：37-39.
Xiong H F, Yao Z H. Physiological responses of *Ceracophyllurn dernersurn* to different nitrogen and phosphorus nutritional conditions[J]. J. Ezhou Univ., 2009, 16 (2): 37-39.

[36] Campbell M L. Recruitment and colonization of vegetative fragments of *Posidonia australis* and *Posidonia coriacea* [J]. Aquat. Bot., 2003, 76(2): 175-184.

[37] 葛绪广，王国祥，陆贻超. 4种沉水植物断枝再生能力研究[J]. 水生态学杂志，2009，2 (4)：23-28.
Ge X G, Wang G X, Lu Y C. Study on regeneration ability of segment in four submerged macrophytes[J]. J. Hydro., 2009, 2 (4): 23-28.

[38] Mielecki M, Pieczynska E. The influence of fragmentation on the growth of *Elodea canadensis* Michx in different light conditions [J]. Pol. J. Eco., 2005, 53(2): 155-164.

[39] 朱丹婷. 光照强度、温度和总氮浓度对三种沉水植物生长的影响[D]. 金华：浙江师范大学硕士学位论文，2011.
Zhu D T. Effect of light, temperature and nitrogen on the growth of three kinds of aquatic plants [D]. Jinhua: Ms thesis of Zhejiang Normal University, 2011.