

水生植物分解过程中生态化学计量学特征研究

张雷燕¹, 关保华², 程寒飞¹, 詹茂华¹

(1. 中冶华天工程技术有限公司, 江苏 南京 210019;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊科学与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要:为揭示水生植物分解过程中的生态化学计量学特征,选取沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)和马来眼子菜(*Potamogeton malaiianus*)以及漂浮植物浮萍(*Lemna minor*),分别置于温室(处理组 A、B)和池塘中(处理组 C),实验时间为5周,每隔1周随机从各重复组中取1份样品,测定干物质重和总氮(TN)、总碳(TC)、总磷(TP)含量,分析其残存干物质的分解过程。结果表明,在整个分解过程中,3种植物的C/N为7.43~10.06,低于全球水平22.5,C/P为43.09~91.77,明显高于全球水平23.2,说明同一种植物在相同的同化C能力前提下,对N的利用效率较高,对P的利用率较低;N/P为4.71~9.24,小于14,说明植物主要受N的限制。沉水植物苦草和马来眼子菜的C/N在温室和自然条件下规律一致,而漂浮植物浮萍则变化较大,说明沉水植物分解C和N的速率一致且不受环境影响,而漂浮植物浮萍分解C和N受环境影响较大;苦草和浮萍残存干物质C/N在开始有一个快速增长期,说明这2种植物N的释放速率超过C;3种植物残存干物质的C/P和N/P都在第1周快速增长且各处理变化较大,说明3种植物P分解速率都在1周内超过C和N,且受环境影响较大。研究结果将对水生态修复过程中是否移除残存水生植物提供理论依据。

关键词:碳;氮;磷;干物质;化学计量学;水生植物

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)06-0034-06

生态化学计量学的概念是在2000年由Elser第一次明确提出的(Elser et al, 2000a),其理论被生态学家所认同,研究主要集中于全球碳(C)、氮(N)、磷(P)生物地球化学循环和生态学过程、植物限制性元素的判断等领域(Bryan et al, 2012)。

植物是生态系统的一个重要组成部分,对生态系统的物质和能量循环起重要的作用,C、N、P元素是植物生长所必需的大量元素,与植物生长的关系非常密切,其元素含量既反映了植物在一定生境条件下从土壤中吸收和蓄积矿质养分的能力,也能反映生态系统中植物种本身的营养元素化学计量比特征(邵梅香等, 2012)。Agren(2004)研究表明,植物的C/N和C/P意味着C(生物量)与养分的比值关系,即养分利用效率;植物的N/P主要受环境因子影响较大,特别是土壤对植物生长养分供应状况(Wassen et al, 1995)。

水生植物作为湖泊生态系统中必不可少的组成部分,其死亡分解过程是生物地球化学循环过程中

的关键一环,受到诸多因素影响,对整个生态系统的营养循环有重要影响(James et al, 1996);植物元素生态化学计量学的研究对揭示植物残存干物质分解速率以及养分的积累和释放机制具有重要意义(Marichal et al, 2011)。植物体腐烂分解初期会向水中迅速释放大量营养盐。因此,研究水生植物腐烂分解过程中营养盐的释放规律以及营养盐释放与环境的关系,能为湖泊水生态修复和水生植物管理提供基础理论依据。

本研究选取沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)和马来眼子菜(*Potamogeton malaiianus*)以及漂浮植物浮萍(*Lemna minor*),通过模拟不同的分解环境,分析3种不同水生植物的残存干物质分解释放C、N、P的规律,探讨水生植物残存干物质分解过程中生态化学计量学特征的变化规律以及与植物在生长过程中的C、N、P之间比值的差异,对湖泊等水生态修复与管理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料选取

苦草、浮萍和马来眼子菜采自江苏无锡五里湖,将其根部的淤泥洗净并去除杂质,带回实验室,于烘箱中40℃烘干至恒重。将苦草和马来眼子菜分别

收稿日期:2016-08-22

基金项目:南京市科技计划项目(201608016);国家自然科学基金(31270409)。

作者简介:张雷燕,1982年生,女,博士,工程师,主要从事水生态修复工作。E-mail: lyzhang27@126.com

剪成 5~10 mm 的小段,浮萍单株分开。称取处理好的苦草(150 ± 1) mg、马来眼子菜(1000 ± 1) mg 和浮萍(1000 ± 1) mg,分别放入编好号的分解网袋(200 目尼龙网,10 cm × 10 cm)中。实验用水为自来水,沉积物取自南京信息工程大学的校内池塘底部。

1.2 实验设计

实验在南京信息工程大学的温室和池塘中进行。设置处理组 A 和 B 分析沉积物对植物分解速率的影响,设置处理组 C 模拟原位水生植物自然分解条件,具体设置见表 1。将苦草、浮萍和马来眼子菜各自分成 3 个处理组,每个处理组设置 3 个重复,每个重复中各有 6 份样品。每次取样随机从 6 份中抽取 1 份用于化学计量学分析。

处理组 A 和 B 在温室中进行,将每个重复组的样品置于烧杯中。为保证恒温,将烧杯均匀放置在添加适量水的塑料大桶内。处理组 C 的样品直接置于校园内池塘中,每个分解纱网中加入相同质地、大小均匀的干净石块,使得每个分解纱网可以沉在池塘的底部,且放置位置与取沉积物的位置相同;同时每个分解纱网上加系一根尼龙绳,以方便每次采样将纱网取出。

表 1 实验设置

Tab. 1 Experimental design

处理组	处理方式	实验地点
A	200 mL 自来水 + 3 cm 沉积物	温室
B	200 mL 自来水	温室
C	不作处理	池塘

1.3 样品采集与处理

测定苦草、马来眼子菜和浮萍总氮(TN)、总碳(TC)、总磷(TP)的初始值。实验时间为 5 周,每隔 1 周随机从各重复组中取 1 份样品,测定干物质重和 TN、TC、TP 的含量。样品取回实验室后,洗净附着于植物残体上的杂质,在 40℃ 下烘干,称重并记

下干物质重,随后将烘干后的样品粉碎研磨,分别测定 TN、TC、TP 含量。TN 和 TC 含量通过元素分析仪(意大利, Euro Vector, EA 3000)测定;TP 含量通过电感耦合等离子体发射光谱仪(美国, Leeman, Prodigy)测定。

1.4 数据处理

应用 SPSS 13.0 统计分析软件中的方差分析,对 3 种植物在不同环境条件下的 C/N、C/P、N/P 进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 水生植物生态化学计量学的变化特征

2.1.1 C/N 比较 对比苦草、浮萍、马来眼子菜残存干物质中 C/N 的变化(图 1),发现 3 种处理的苦草 C/N 随着实验时间的增加呈现出先急速上升、后缓慢下降,最后逐渐趋于平稳的趋势;3 种处理的浮萍 C/N 先急速上升、后上升的速度趋于缓慢;马来眼子菜的 C/N 总体变化较小,维持在 10 上下波动。

3 种环境条件下,苦草残存物质 C/N 变化趋势一致,其差异不显著($P > 0.05$),表明苦草 C、N 释放率一致,C/N 较稳定,受环境的影响较小。浮萍处理组 B 的 C/N 高于其他 2 个处理组。3 种环境条件对马来眼子菜残存物 C/N 的影响差异不显著($P > 0.05$)。

2.1.2 C/P 比较 苦草、浮萍、马来眼子菜残存干物质中 C/P 的变化如图 2 所示,不同环境条件对水生植物 C/P 的影响呈现出一定的规律。苦草中处理 B 的 C/P 呈现先急速上升、后稳步上升的趋势;其他 2 个处理组呈现先急速上升、后急速下降、最后上升的趋势。浮萍处理 A 的 C/P 先急速上升、后缓慢上升,其他 2 个处理组呈现先急速上升、后逐渐趋于平稳。马来眼子菜处理 B 中 C/P 先急速上升、后逐渐趋于平稳,其他 2 个处理中 C/P 在第 1 周后呈现下降趋势,随后稳步上升趋于平稳。

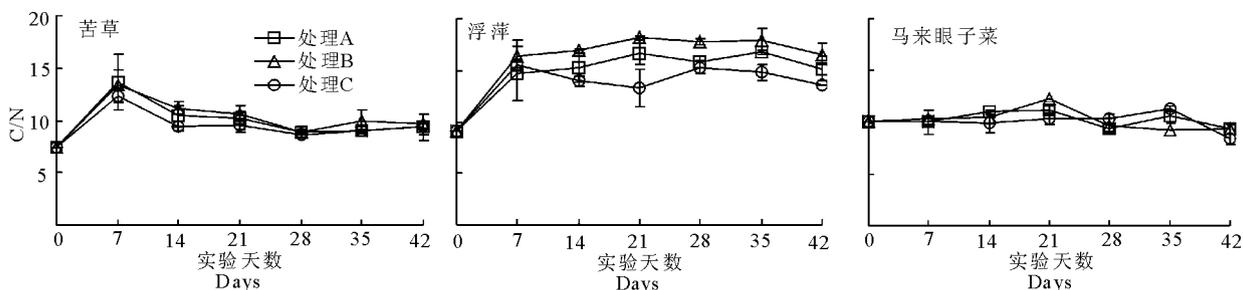


图 1 苦草、浮萍、马来眼子菜残存干物质中的 C/N 变化

Fig. 1 Variation of C/N with time in dried plant material from *V. natans*, *L. minor* and *P. malaianus*

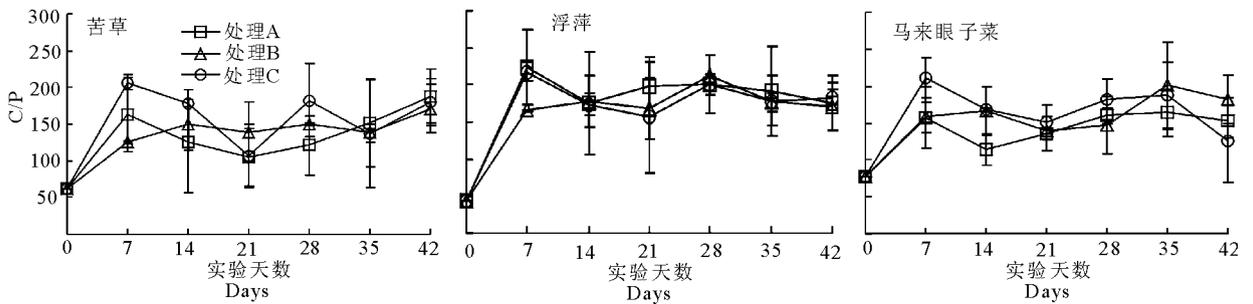


图2 苦草、浮萍、马来眼子菜残存干物质中的 C/P 变化

Fig. 2 Variation of C/P with time in dried plant material from *V. natans*, *L. minor* and *P. malaianus*

2.1.3 N/P 比较 植物残存物质 N/P 变化如图 3 所示。苦草 3 个处理组中 N/P 总体呈现上升的趋势；浮萍残存干物质中 N/P 呈先上升、后下降趋势，第 1 周上升迅速，之后总体呈下降趋势，处理组 B 在实验期间 N/P 均是 3 个处理组中最低的。马来眼子菜中 N/P 在第 1 周急速上升，且处理组 C 的数值高于处理组 A 和 B，之后在 17 上下波动。3 种环境条件下，浮萍残存物质 N/P 变化趋势一致，处理组 A、C 与处理组 B 的 N/P 差异显著 ($P < 0.05$)，表

明水环境对浮萍残存物质 N/P 的影响最小。

2.2 水生植物生态化学计量学特征的差异

对比不同植物分解 1 周后残存物中 C/N、C/P、N/P 的变化 (图 4)，其中 O 表示试验初始值，A、B、C 分别表示对应的处理组。对于 C/N 来说，分解 1 周后，马来眼子菜中 C/N 几乎无变化；苦草和浮萍中 C/N 上升明显，浮萍处理 B 中 C/N 最大，而且高于其他植物的 C/N；苦草中 C/N 的大小顺序为：处理 A > 处理 B > 处理 C。

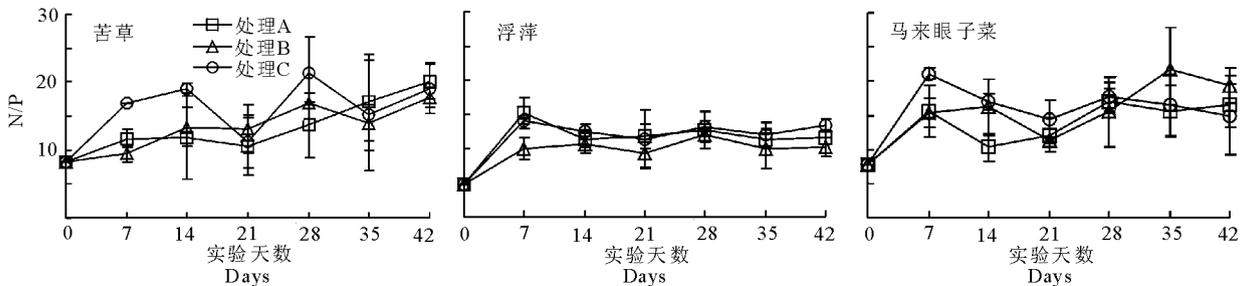


图3 苦草、浮萍、马来眼子菜残存干物质中的 N/P 变化

Fig. 3 Variation of N/P with time in dried plant material from *V. natans*, *L. minor* and *P. malaianus*

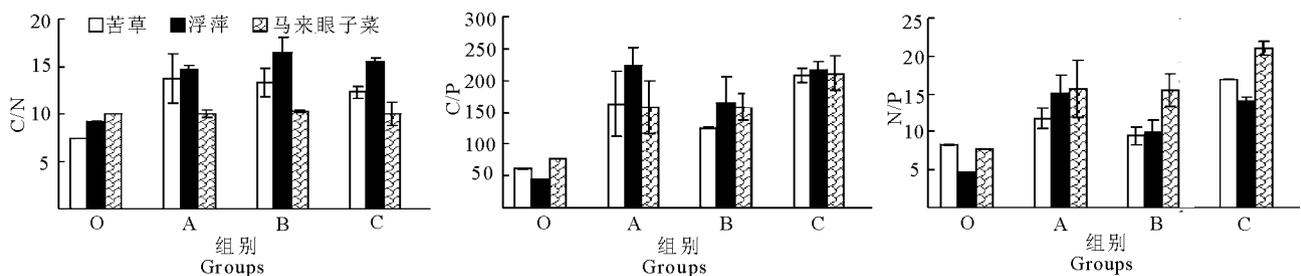


图4 不同植物分解 1 周后残存物中的 C/N、C/P、N/P 变化

Fig. 4 C/N, C/P and N/P in dry material from each macrophyte of each treatment after one week

O is the initial ratio for each macrophyte and A, B and C are the ratios after one week for each treatment.

对于 C/P，分解 1 周后，残存干物质中 C/P 变化均明显，其中浮叶植物 (浮萍) 处理 A 中 C/P 最大，高于沉水植物的 C/P；沉水植物中 C/P 均是处理 C 高于其他 2 个处理组。

对于 N/P，分解 1 周后，残存干物质中 N/P 变化均明显，其中马来眼子菜中 N/P 最大，高于其他

植物的 N/P；苦草、马来眼子菜中 N/P 均是处理 C 高于其他 2 个处理组；浮萍中 N/P 的大小顺序为：处理 A > 处理 C > 处理 B。

在 3 种环境条件下，浮叶植物 (浮萍) 的 C/N、C/P 均高于沉水植物 (苦草、马来眼子菜)，说明浮叶植物的 C/N、C/P 受环境因子变化的影响较大。

在室内环境中(处理 A、B),N/P 的大小顺序为:马来眼子菜 > 浮萍 > 苦草,说明室内环境对马来眼子菜的 N/P 影响较大。在自然环境中(处理 C),N/P 的大小顺序为:马来眼子菜 > 苦草 > 浮萍,说明自然环境对马来眼子菜的 N/P 影响最大。

3 讨论

3.1 不同植物 C/N、C/P、N/P 的变化规律

元素利用量之间的相关使植物体具有在变化的环境中保持其体内化学组成相对恒定的能力(刘兴华,2013)。枯落物分解过程是以碳为主导的物质循环模式,随着分解过程的进行,残留枯落物的氮、磷等养分发生积聚或释放,进而改变枯落物分解过程中碳、氮、磷的比值(Manzoni et al,2010)。水生植物的降解过程主要包括:①残体干物质快速减少阶段,该阶段主要是易分解物质的释放过程;②残体干物质缓慢减少阶段,主要是微生物将难分解的化合物转化为无机化合物的过程(厉恩华等,2006;叶春等,2009)。陈梦琪等(2015)研究表明,苦草和黑藻在第 1 周迅速分解,之后分解速率明显下降。

本研究中,苦草 3 种处理 C/N 变化趋势相似,均为先上升、后下降,表明在降解初期 C 的分解释放速率大于 N;随着时间的推移,微生物对 N 降解的速率逐渐增大,最后 C/N 趋于稳定。浮萍 3 种处理 C/N 一直处于上升状态,表明 C 降解释放得更快。马来眼子菜的 C/N 总体变化不大,表明 C、N 的降解释放速度变化不大,而且植物残存物的 C/N 仍然维持存活时的比值范围。

苦草、浮萍、马来眼子菜的 C/P 在分解的第一阶段均是 C 分解速率大于 P,随着时间的推移,分解速率呈现不同的变化趋势,这可能是由微生物对 C、P 降解的难易程度造成。

苦草中 N/P 总体呈现上升趋势,可能是因为 N 分解释放的速率一直高于 P。浮萍中 N/P 先上升、后下降,表明 N 的分解释放速率先高于 P,之后 P 的分解速率上升的较快。马来眼子菜在分解的第一阶段均上升,N 的分解释放速率高于 P,表明在植物死亡分解时,N 的分解释放速度最快。

3.2 不同植物 C、N、P 生化计量特征及限制因子

C/N 和 C/P 反映了 C(生物量)与养分元素之间的比值关系,植物体的 C/N 和 C/P 意味着植物吸收营养元素所能同化 C 的能力,在一定程度上反映了植物体的营养元素利用效率,因而具有一定的生态学意义(黄建军等,2003)。本研究中,3 种植物的

C/N 为 7.43 ~ 10.06,低于全球水平 22.5,C/P 为 43.09 ~ 91.77,明显高于全球水平 23.2(Elser et al,2000b);说明同一种植物在相同的同化 C 能力前提下,对 N 的利用效率较高,对 P 的利用率较低。刘兴华(2013)研究表明,白茅(*Imperata cylindrica*)/拂子茅(*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*)具有较高的 C/N 主要得益于其生态环境,枯落物归还积累量大,土壤富集养分含量高,植物体能够利用的养分元素库源相对丰富。

植物叶片或生物量中 N/P 可作为判断环境对植物生长的养分供应状况和植物生长速率的重要指标。不同植物体对 N、P 需求量的绝对值由于其自身的转化机制和利用方式的不同而不同,但相对值可能存在着一定的相关性,即吸收利用一定量 N 的同时,也需要一定量 P(刘兴华,2013);Koerselman 等(1996)研究表明,湿地生态系统具有 N/P 阈值,当植物叶片 N/P > 16,植物受 P 限制,N/P < 14,受 N 限制,处于二者之间则共同限制或者都不限制。本研究中 3 种植物的 N/P 为 4.71 ~ 9.24,小于 14,说明植物主要受 N 的限制。

3.3 影响水生植物 C/N、C/P、N/P 差异的因素

水生植物腐烂分解和所含营养物质的释放受多种因素影响,受植物自身的结构特征和化学组成等影响,如木质素和纤维素含量较高的植物降解速率较低(Szabo et al,2000);还主要受水体环境温度、沉积物、溶解氧、营养盐、微生物和附着动植物等方面的影响(Brock et al,1982;张智等,2005)。本研究中,浮萍的 C/N、苦草的 N/P 在室温只有水的条件下(处理组 B)高于其他 2 个处理组,可能是只有水的环境下,缺乏微生物对 N、P 的降解。温度作为影响水生植物降解速率的重要因素之一,其升高会使得微生物的活动变得活跃,微生物丰度和活性也会产生差异,从而加快了植物的降解速率(熊秉红等,2000);叶春等(2009)在实验中发现,黑藻分解过程有明显的阶段性,其分解速率与周围环境温度显著相关;陈梦琪等(2015)研究表明,在温度较高的棚内,苦草和黑藻的分解速率均高于棚外。在本研究中,由于温室中使用的水和沉积物均来自于池塘,所以理论上微生物的多样性应该是一致的,但实际上微生物的群落结构在转移到室内会发生变化,导致马来眼子菜中 N/P 在池塘自然水体中(处理组 C)高于处理组 A 和 B;在分解的第一阶段,苦草、马来眼子菜中 C/P、N/P 均是处理 C 高于其他 2 个处理组,这也说明自然水体的条件复杂,微生物的种类和

丰度高于室内环境,有利于N、P的降解。因此在自然湖泊和河流中,要尽可能的将死亡植物残体打捞出水体,减少其腐烂分解对水体的二次污染。

4 结论

(1)不同水生植物的残存干物质在分解过程中呈现出不同的生态化学计量学特征。

(2)3种植物的C/N为7.43~10.06,C/P为43.09~91.77,N/P为4.71~9.24;马来眼子菜中N/P在池塘自然水体中高于温室中。

(3)在分解的第一阶段,温室和自然水体中的浮叶植物(浮萍)的C/N、C/P均高于沉水植物(苦草、马来眼子菜)。

(4)在温室中,N/P的大小顺序为:马来眼子菜>浮萍>苦草;在自然水体中,N/P的大小顺序为:马来眼子菜>苦草>浮萍。

参考文献

- 陈梦琪,郑建伟,蒋跃平等,2015. 沉水植物降解及营养盐释放规律[J]. 江苏农业科学, 43(10): 411-413.
- 黄建军,王希华,2003. 浙江天童32种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), (3): 92-97.
- 厉恩华,刘贵华,李伟,等,2006. 洪湖三种水生植物的分解速率及氮、磷动态[J]. 中国环境科学, 26(6): 667-671.
- 刘兴华,2013. 黄河三角洲湿地植物与土壤C、N、P生态化学计量特征研究[D]. 济南:山东农业大学.
- 邵梅香,覃林,谭玲,2012. 我国生态化学计量学研究综述[J]. 安徽农业科学, 40(11): 6918-6920.
- 熊秉红,李伟,2000. 我国苦草属植物的生态学研究[J]. 武汉植物学研究, 18(6): 200-508.
- 叶春,王博,2009. 沉水植物黑藻早期分解过程及影响因素研究[J]. 中国农学通报, 25(17): 5-10.
- 张智,刘亚丽,龙腾锐,等,2005. 重庆双龙湖水草对营养盐的吸附与释放试验研究[J]. 资源环境与工程, 19(4): 305-310.
- Agren G I, 2004. The CNP stoichiometry of autotrophs-theory and observations[J]. Ecology, (7): 85-191.

- Brock T C M, Huijbregts C A M, Van de Steeg-Huberts M J H A, et al, 1982. In situ studies on the breakdown of *Nymphoides peltata* (Gmel.) O. Kuntze (Menyanthaceae): some methodological aspects of the litter bag technique[J]. Hydrobiological Bulletin, 16: 35-49.
- Bryan S G, Annette S, Michael B, 2012. C : N : P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess[J]. Ecological Processes, 1(6): 1-11.
- Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al, 2000. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food web[J]. Nature, 408: 578-580.
- Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al, 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 3(6): 540-550.
- James W F, Barko J W, Field S J, 1996. Phosphorus mobilization from littoral sediments of an inlet region in Lake Delavan, Wisconsin [J]. Arch Hydrobiologia, 138(2): 245-257.
- Koerselman W, Meuleman A F M, 1996. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. Journal of Ecology, 33(6): 1441-1450.
- Manzoni S, Trofymow J A, Jackson R B, et al, 2010. Stoichiometric controls on carbon and phosphorus dynamics in decomposing litter[J]. Ecological Monographs, 80(1): 89-106.
- Marichal R, Mathieu J, Couteaux M M, et al, 2011. Earthworm and microbe response to litter and soils of tropical forest plantations with contrasting C : N : P stoichiometric ratios[J]. Soil Biology and Biochemistry, 43(7): 1528-1535.
- Szabo S, Braun M, Nagy P, et al, 2000. Decomposition of duckweed (*Lemna gibba*) under axenic and microbial conditions: flux of nutrients between litter water and sediment the impact of leaching and microbial degradation [J]. Hydrobiologia, 434: 201-210.
- Wassen M J, Olde Venterink H G M, De Swart Eoam, 1995. Nutrient concentrations in mire vegetation as a message of nutrient limitation in mire ecosystems[J]. Journal of Vegetation Science, 6: 5-16.

(责任编辑 万月华)

Ecological Stoichiometry Characteristics of Aquatic Macrophytes in the Decomposition Process

ZHANG Lei-yan¹, GUAN Bao-hua², CHENG Han-fei¹, ZHAN Mao-hua¹

(1. Huatian Engineering & Technology Corporation, MCC, Jiangsu Nanjing 210019, P. R. China;

2. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Science,
Jiangsu Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: Plant matter from three macrophytes from different environments was dried and analyzed over time to investigate macrophyte stoichiometry during decomposition and the effect of environment on macrophyte stoichiometry. A floating plant, *Lemna minor*, and two submerged plants, *Vallisneria natans* and *Potamogeton malaianus*, were prepared and placed in three water environments: Treatment A: beaker with 200 mL tap water + 3 cm of sediment in a greenhouse; Treatment B: beaker with 200 mL tap water in a greenhouse; Treatment C: in situ in a pond. Each treatment was run in triplicate with six plants per trial. Each week for five weeks, one plant was randomly selected from each treatment for determination of dry weight, TN, TC and TP. The C/N range in the three macrophytes was 7.43 – 10.06, much lower than the global level of 22.5, and the C/P range was 43.09 – 91.77, significantly higher than the global level of 23.2. The results indicate that, with the same assimilation capacity of C, the utilization efficiency of N is higher than that of P. The N/P range (4.71 – 9.24) in the three macrophytes was lower than the global level of 14, showing that N was the limiting nutrient for the macrophytes. Furthermore, the submerged plants *V. natans*, and *P. malaianus* exhibited similar C/N ratios in the greenhouse and under natural conditions, indicating a consistent release rate of C and N from the submerged macrophytes and implying a small environmental effect. However, the C/N ratio of *L. minor* varied markedly between treatments, implying a large environmental effect. The C/N ratio in *L. minor* and *V. natans* increased rapidly at the beginning, indicating that the release rate of N from both macrophytes was higher than the release rate of C. The C/P and N/P ratio in the three macrophytes increased rapidly in the first week and the ratios varied significantly among the three groups. This indicates that the P release rate from the three macrophytes was higher than the release rates of C and N during the first week and the environmental effect was significant. This research provides a theoretical basis for the removal of residual aquatic plants during ecological restoration.

Key words: carbon; nitrogen; phosphorus; dry matter; stoichiometry; aquatic macrophyte