

芦苇和香蒲地上部 N 和 P 积累动态及 适宜收获时期分析

熊霞, 孙庆业^①

(安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 通过野外采样和室内分析相结合的方法, 对 5 月至 11 月芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.] 和香蒲 (*Typha orientalis* Presl) 地上部生物量以及 N 和 P 的含量和积累量的动态变化进行了分析, 并对生物量、N 和 P 含量及 N 和 P 积累量间的相关性进行了研究; 在此基础上, 确定芦苇和香蒲的适宜收获时期。结果表明: 在整个生长过程中, 芦苇和香蒲地上部生物量随生长时间延长呈典型的单峰型曲线, 最高值分别出现在 9 月份和 10 月份, 且芦苇地上部生物量极显著高于香蒲 ($P < 0.01$)。芦苇和香蒲地上部 N 含量呈先升高后降低的趋势, P 含量呈逐渐降低的趋势, 香蒲地上部 N 和 P 含量均极显著高于芦苇地上部。芦苇地上部 N 和 P 积累量在 8 月份达到最高, 香蒲地上部 N 和 P 积累量在 9 月份达到最高。芦苇和香蒲地上部 C/N、C/P 和 N/P 比在不同月份差异较大, C/N 和 N/P 比呈波动趋势, C/P 比则总体呈逐渐升高的趋势。总体来看, 芦苇和香蒲的生长在生长初期和中期受 N 限制, 在生长末期受 P 限制。相关性分析结果表明: 芦苇和香蒲地上部的 N 含量与 P 含量、N 积累量与 P 积累量间均呈极显著正相关; N 和 P 积累量与其生物量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 但与 N 和 P 含量的相关性不显著 ($P > 0.05$)。综合分析结果表明: 芦苇和香蒲的适宜收获时期分别为 8 月份和 9 月份。

关键词: 芦苇; 香蒲; 生物量; N 和 P 积累量; 富营养化水体; 收获时期

中图分类号: Q948.8; X171.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)01-0071-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.01.11

Analyses on accumulation dynamics of N and P in above-ground part and appropriate harvest period of *Phragmites australis* and *Typha orientalis* XIONG Xia, SUN Qingye^① (School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(1): 71-77

Abstract: By combining methods of field investigation and laboratory analysis, dynamic changes of biomass, contents and accumulations of N and P of above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. and *Typha orientalis* Presl from May to November were analyzed, and correlations among biomass, N and P contents, and N and P accumulations were researched. On this basis, appropriate harvest period of two plants was also determined. The results show that during the whole growth process, biomass of above-ground part of two plants appears a typical single-peak curve with prolonging of growth time, their maximum biomass appears in September and October, respectively, and biomass of above-ground part of *P. australis* is obviously significantly higher than that of *T. orientalis* ($P < 0.01$). N content in above-ground part of *P. australis* and *T. orientalis* appears a trend of first increasing and then decreasing, while P content appears a trend of gradually decreasing. Contents of N and P in above-ground part of *T. orientalis* are obviously significantly higher than those of *P. australis*. Accumulations of N and P in above-ground part of *P. australis* are the highest in August, and those of *T. orientalis* are the highest in September. There are larger differences in ratios of C/N, C/P and N/P of above-ground part of *P. australis* and *T. orientalis* among different months, ratios of C/N and N/P appear fluctuating trends, and ratio of C/P appears a trend of gradually increasing. On the whole, growth of *P. australis* and *T.*

收稿日期: 2013-07-19

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX07103-002); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC10B02)

作者简介: 熊霞(1987—), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事环境修复技术方面的研究。

^①通信作者 E-mail: sunqingye@ahu.edu.cn

orientalis in the early and middle periods of growth process is limited by N, and that in the end period is limited by P. The result of correlation analysis shows that there are obviously significant positive correlations between contents of N and P, and between accumulations of N and P in above-ground part of two plants, and there are also significantly positive correlations of N and P accumulations with biomass ($P < 0.05$), but correlations of N and P accumulations with N and P contents are not significant ($P > 0.05$). The result of comprehensive analysis shows that appropriate harvest period of *P. australis* and *T. orientalis* is August and September, respectively.

Key words: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; *Typha orientalis* Presl; biomass; N and P accumulations; eutrophic water; harvest period

湿地植物是人工湿地处理系统中不可缺少的组成部分^[1],在人工湿地处理污水过程中起着至关重要的作用。湿地植物一方面可同化吸收污染物质并将其积累在体内达到去除水体中污染物的目的,另一方面通过为微生物提供良好的根区环境,促进微生物转换降解污染物^[2]。湿地植物芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.] 和香蒲 (*Typha orientalis* Presl) 生长繁殖快且生物量大,能高效去除水体中 N、P 和重金属等污染物,常被用于人工湿地的构建。

不少学者对芦苇和香蒲等湿地植物去除水体中 N 和 P 的能力进行了研究,通过植物体内 N 和 P 的积累量确定其对人工湿地脱 N 除 P 的贡献,但并未考虑不同生长发育阶段植物对养分的吸收释放规律^[3-5]。吴统贵等^[6]认为:杭州湾滨海湿地中芦苇地上部生物量在生长期呈先增加后降低的趋势,在 9 月份达到最大;各器官的 N 和 P 含量在整个生长季节呈波动变化。郭长城等^[7]认为:在南四湖湿地生态保护区,香蒲体内 N 和 P 含量变化具有季节性规律。可见,湿地植物芦苇和香蒲对人工湿地脱 N 除 P 具有重要贡献,但它们对 N 和 P 的吸收受其生长时期的影响。

湿地植物能有效吸收利用污水中的 N 和 P 等养分进行生长并达到去除水体中 N 和 P 的目的^[8],但大量的植物残体如不及时收获和移除,其腐败过程则会导致水体二次污染和水质恶化^[9]。湿地植物通过自身的生长代谢吸收水体中的 N 和 P,其吸收能力随季节不同而存在差异。盛婧等^[10]的研究结果显示:富营养化水体中凤眼莲 [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Sloms] 的采收季节、采收量、采收比例及采收频率与其生长和生物量相关,对富营养化水体中 N 和 P 的清除效率也有明显影响。因此,选择合理的采收时间对湿地植物有效吸收 N 和 P 有关键作用^[11]。

作者对湿地植物芦苇和香蒲的地上部生物量及 N 和 P 含量和积累量的动态变化进行研究,确定芦苇

和香蒲的适宜收获时期,以期最大限度发挥芦苇和香蒲对水体中 N 和 P 去除的效率,为富营养化水体修复过程中芦苇和香蒲的科学应用提供实验依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽大学磬苑校区,地理坐标为北纬 30°45′、东经 117°10′;多年平均气温 15.7 °C,最冷月 1 月份均温 2.6 °C,最热月 7 月份均温 28.0 °C,多年平均降水量 997 mm。该校区内有多处池塘湿地,主要植物群落为芦苇群落和香蒲群落;本研究选择其中一处池塘为研究区,面积 1 000 m²。

1.2 样品采集

于 2012 年 5 月至 11 月每月采样 1 次,共 7 次,采样时间为当月 20 日至 23 日。在研究区内选取长势和高度大体一致的芦苇和香蒲群落,分别布设 3 个“V”字形的样方进行采样,每个样方面积 1 m×1 m;参照文献^[12]采用收获法采集植物地上部分。

1.3 样品测定

植物地上部生物量(干质量)采用烘干-称重法测定。样品于 105 °C 条件下杀青 30 min,然后置于 70 °C 条件下烘干至恒质量,粉碎过筛。样品中的 C 和 N 含量采用元素分析仪(Elementar Vario MACRO)测定;P 含量采用硫酸-高氯酸消解、钒钼黄比色法^[13]测定。

1.4 数据处理

根据芦苇和香蒲地上部生物量及 N 和 P 含量分别计算 N 和 P 积累量,计算公式为:N 或 P 积累量=地上部 N 或 P 含量×单位面积生物量。

采用 SPSS 16.0 统计分析软件进行数据处理,并进行 One-Way ANOVA 方差分析(采用 LSD 法进行多重比较)和 Pearson 相关性分析;采用 EXCEL 2003 数

据处理软件制作图表。

2 结果和分析

2.1 芦苇和香蒲地上部生物量的动态变化

不同月份芦苇和香蒲地上部生物量见表1。在整个生长期(5月至11月),芦苇和香蒲地上部生物量的动态变化均呈典型的单峰型曲线,且各月份芦苇地上部生物量均极显著高于香蒲($P<0.01$)。芦苇地上部生物量9月份前基本呈直线增长,月平均生长速率为 $538.69\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,8月份的生长速率最大($631.23\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$);9月至11月,芦苇叶片开始枯黄凋落,植株逐渐枯死,地上部生物量逐渐下降,芦苇地上部生物量在9月份达到最大值($2482.80\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),显著高于其他月份($P<0.05$)。5月至10月,香蒲地上部生物量持续增加,月平均生长速率 $309.17\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,9月份的生长速率最大($672.63\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),10月份以后地上部生物量开始下降,地上部生物量最大值出现在10月份,为 $1723.22\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,显著高于其他各月份。

表2 不同月份芦苇和香蒲地上部N和P含量($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Contents of N and P in above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. and *Typha orientalis* Presl in different months ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

月份 Month	芦苇地上部 Above-ground part of <i>P. australis</i>				香蒲地上部 Above-ground part of <i>T. orientalis</i>			
	N含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ N content		P含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ P content		N含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ N content		P含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ P content	
5月 May	10.73±0.31d		1.63±0.19a		13.83±0.32c		1.85±0.18a	
6月 June	12.96±0.31b		1.25±0.11b		15.90±0.53b		1.68±0.07bc	
7月 July	14.70±0.46a		1.04±0.13c		15.31±0.40b		1.76±0.05ab	
8月 August	11.43±0.24c		0.95±0.04c		18.70±0.17a		1.55±0.04c	
9月 September	8.33±0.12e		0.66±0.06d		15.37±0.59b		1.34±0.08d	
10月 October	6.13±1.40f		0.31±0.03e		7.23±0.75e		0.65±0.04e	
11月 November	6.47±0.12f		0.34±0.01e		9.77±0.49d		0.59±0.05e	

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

0.31~1.63和0.59~1.85 $\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值分别为0.88和1.35 $\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;2种植物地上部N含量均极显著高于P含量($P<0.01$),说明2种植物在生长过程中(5月至11月)对N的吸收强于对P的吸收。分析结果表明:香蒲地上部N和P含量在生长过程中均极显著高于芦苇地上部N和P含量,且芦苇地上部N含量与P含量间的相关方程为 $y=0.1094x-0.2208$ ($R^2=0.5243$),香蒲地上部N含量与P含量间的相关方程为 $y=0.1060x-0.1085$ ($R^2=0.6308$),均呈极显著正相关。

表1 不同月份芦苇和香蒲地上部生物量($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Biomass of above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. and *Typha orientalis* Presl in different months ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

月份 Month	地上部生物量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ Biomass of above-ground part	
	芦苇 <i>P. australis</i>	香蒲 <i>T. orientalis</i>
5月 May	328.03±17.32f	177.36±26.46e
6月 June	883.86±43.59e	254.56±52.92e
7月 July	1317.41±41.03d	432.59±51.73d
8月 August	1948.64±42.52c	748.46±43.09d
9月 September	2482.80±60.83a	1421.09±40.10b
10月 October	2353.22±51.96b	1723.22±36.06a
11月 November	1387.24±52.87d	842.47±62.45c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

2.2 芦苇和香蒲地上部N和P含量的动态变化

不同月份芦苇和香蒲地上部N和P含量见表2。由表2可见:芦苇和香蒲地上部N含量范围为6.13~14.70和7.23~18.70 $\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值分别为10.09和13.74 $\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;芦苇和香蒲地上部P含量分别为

2.3 芦苇和香蒲地上部N和P积累量的动态变化

不同月份芦苇和香蒲地上部N和P积累量见表3。由表3可以看出:芦苇地上部N和P的积累量在生长发育阶段(5月至11月)呈先增加后降低的趋势,其最大值出现在8月份,分别为(22.23 ± 0.84)和(1.85 ± 0.08) $\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在生长发育初期,芦苇对养分的需求较大、体内N和P含量较高,但由于其生长缓慢、生物量较低,因此其N和P积累量较少;6月份后,N和P积累量急剧增加。方差分析结果表明:7月至9月芦苇生长中期地上部的N和P积累量显著高

于生长前期的5月和6月和生长后期的10月和11月 ($P<0.05$)。由表3还可以看出:香蒲地上部N和P积累量动态变化趋势与芦苇一致,呈典型的单峰型曲线,其N和P积累量的最大值出现在9月份,分别为 (21.83 ± 1.35) 和 (1.90 ± 0.16) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,且与其他各月份N和P积累量差异显著。此外,2种植物地上部N积累量极显著大于P积累量 ($P<0.01$),说明芦苇和香蒲在初级生产中对N的需求要高于P。研究结果表明:在整个生长过程中,芦苇地上部N积累量显著大于香蒲地上部N积累量,但芦苇地上部P积累量与香蒲地上部P积累量差异不显著 ($P>0.05$)。推测原因是:虽然芦苇地上部生物量极显著高于香蒲地上部生物量,但芦苇地上部P含量极显著低于香蒲地上

部P含量。相关性分析结果表明:芦苇地上部N积累量与P积累量间的相关方程为 $y=0.071\ 3x+0.076\ 2$ ($R^2=0.775\ 1$),香蒲地上部N积累量与P积累量间的相关方程为 $y=0.080\ 8x+0.068\ 2$ ($R^2=0.947\ 5$),均呈极显著正相关。

2.4 芦苇和香蒲地上部N和P积累量与生物量及N和P含量的相关性分析

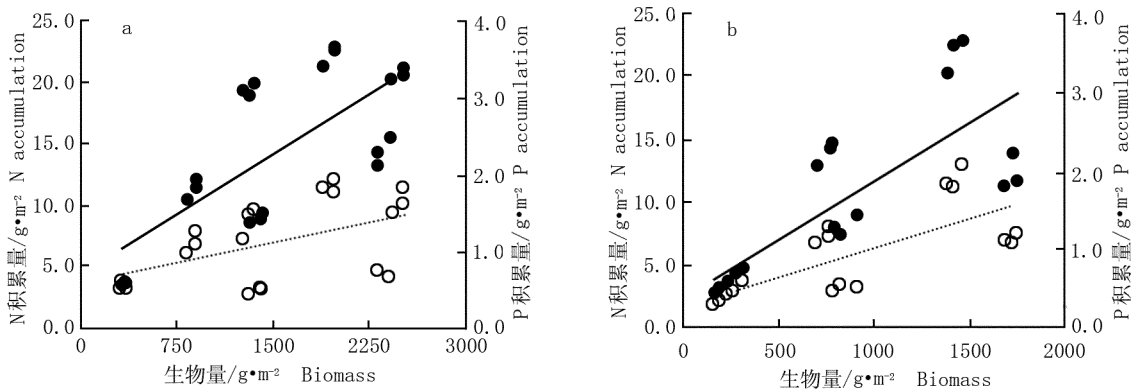
芦苇和香蒲地上部N和P积累量与生物量及N和P含量的相关性分析结果见图1至图3。结果表明:芦苇地上部N和P积累量与生物量的相关方程分别为 $y_N=0.006\ 5x+4.375\ 2$ ($R^2=0.554\ 0$) 和 $y_P=0.000\ 3x+0.587\ 6$ ($R^2=0.222\ 8$),呈显著正相关 ($P<0.05$)。香蒲地上部N和P积累量与其生物量的相

表3 不同月份芦苇和香蒲地上部N和P积累量 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Accumulations of N and P in above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. and *Typha orientalis* Presl in different months ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

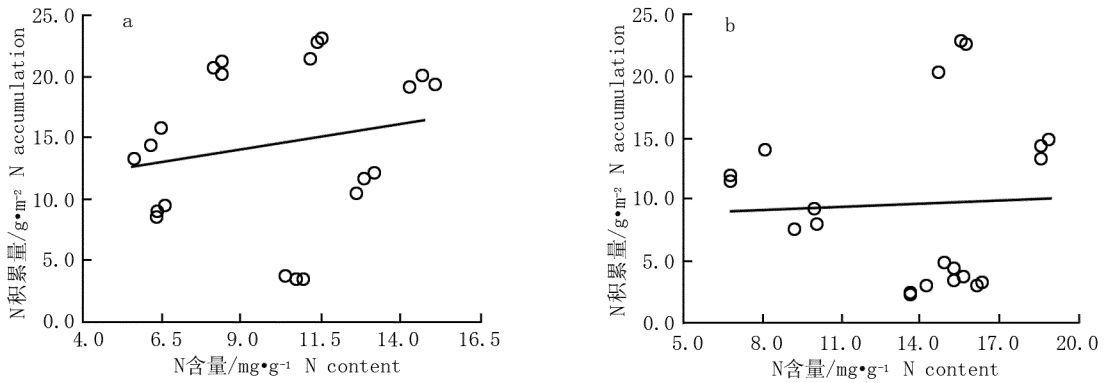
月份 Month	芦苇地上部 Above-ground part of <i>P. australis</i>		香蒲地上部 Above-ground part of <i>T. orientalis</i>	
	N 积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ N accumulation	P 积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ P accumulation	N 积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ N accumulation	P 积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ P accumulation
5月 May	3.53±0.11f	0.54±0.04de	2.50±0.43d	0.34±0.07c
6月 June	11.36±0.81d	1.10±0.14c	3.48±0.72d	0.37±0.10c
7月 July	19.40±0.56b	1.38±0.21b	3.97±0.72d	0.46±0.10c
8月 August	22.23±0.84a	1.85±0.08a	14.03±0.90b	1.17±0.08b
9月 September	20.66±0.42ab	1.65±0.17a	21.83±1.35a	1.90±0.16a
10月 October	14.42±1.22c	0.72±0.06d	12.45±1.38b	1.12±0.08b
11月 November	8.99±0.46e	0.47±0.03e	8.21±0.80c	0.50±0.05c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).



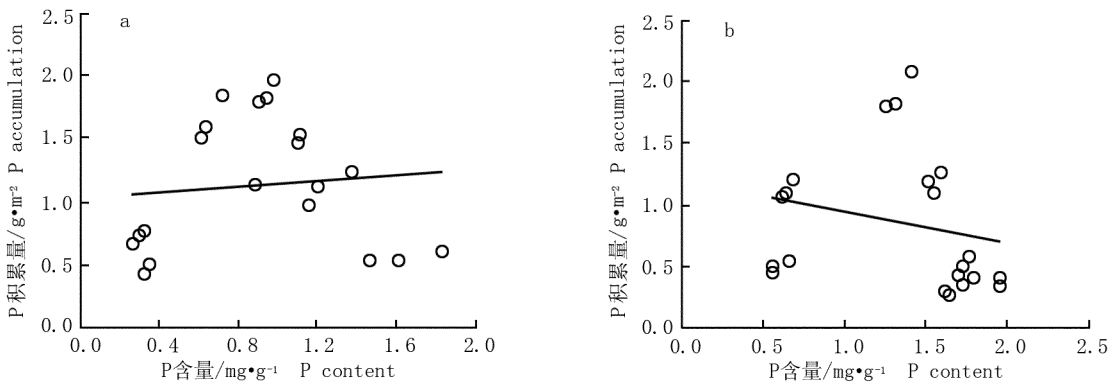
●: N 积累量 N accumulation; —: N 积累量与地上部生物量的拟合直线 Fitting line between N accumulation and biomass of above-ground part;
○: P 积累量 P accumulation;: P 积累量与地上部生物量的拟合直线 Fitting line between P accumulation and biomass of above-ground part.

图1 芦苇(a)和香蒲(b)地上部生物量与N和P积累量的相关性
Fig. 1 Correlation of biomass with accumulations of N and P in above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (a) and *Typha orientalis* Presl (b)



○: N 积累量 N accumulation; —: N 积累量与 N 含量的拟合直线 Fitting line between N accumulation and N content.

图 2 芦苇 (a) 和香蒲 (b) 地上部 N 积累量与 N 含量的相关性
 Fig. 2 Correlation between N accumulation and N content in above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (a) and *Typha orientalis* Presl (b)



○: P 积累量 P accumulation; —: P 积累量与 P 含量的拟合直线 Fitting line between P accumulation and P content.

图 3 芦苇 (a) 和香蒲 (b) 地上部 P 积累量与 P 含量的相关性
 Fig. 3 Correlation between P accumulation and P content in above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (a) and *Typha orientalis* Presl (b)

关方程分别为 $y_N = 0.0094x + 2.2905 (R^2 = 0.6499)$ 和 $y_P = 0.0008x + 0.2574 (R^2 = 0.6070)$, 也均呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

芦苇地上部 N 和 P 积累量与其 N 和 P 含量的相关方程分别为 $y_N = 0.4299x_N + 10.0340 (R^2 = 0.0412)$ 和 $y_P = 0.1072x_P + 1.0064 (R^2 = 0.0089)$, 香蒲地上部 N 和 P 积累量与其 N 和 P 含量间的相关方程分别为 $y_N = 0.0785x_N + 8.4161 (R^2 = 0.0019)$ 和 $y_P = -0.2544x_P + 1.1776 (R^2 = 0.0517)$, 相关性均不显著 ($P > 0.05$), 说明芦苇和香蒲地上部 N 和 P 积累量主要受其生物量的影响。

2.5 芦苇和香蒲地上部 C/N、C/P 和 N/P 比的动态变化

不同月份芦苇和香蒲地上部的 C/N、C/P 和 N/P 比见表 4。由表 4 可见: 芦苇和香蒲地上部 C/N、C/P 和 N/P 比在不同生长时期差异较大。芦苇和香蒲地上部 C/N 比在整个生长季节 (5 月至 11 月) 内呈现先降低后升高的趋势, C/P 比总体呈逐渐升高的趋势, N/P 比则呈波动变化。当 N/P 比在合适范围 (14 ~ 16) 内时, 表明植物生长不受养分 N 和 P 的限制^[14]。芦苇地上部 N/P 比表现为生长末期 (10 月份和 11 月份) 较高, 其 N/P 比高于 16, 且显著高于其他各月份

($P < 0.05$); 只有 7 月份 N/P 比在合适范围内, 其他月份 N/P 比均低于 14。香蒲地上部 N/P 比在 11 月份高于 16, 与其他各月份差异显著; 其他各月份 N/P 比

均低于 14, 整个生长季节其 N/P 比均不在合适范围内。总体来看, 芦苇和香蒲的生长在生长初期和中期受 N 限制, 在生长末期受 P 限制。

表 4 不同月份芦苇和香蒲地上部的 C/N、C/P 和 N/P 比 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Ratios of C/N, C/P and N/P of above-ground part of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. and *Typha orientalis* Presl in different months ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

月份 Month	芦苇地上部 Above-ground part of <i>P. australis</i>			香蒲地上部 Above-ground part of <i>T. orientalis</i>		
	C/N 比 C/N ratio	C/P 比 C/P ratio	N/P 比 N/P ratio	C/N 比 C/N ratio	C/P 比 C/P ratio	N/P 比 N/P ratio
5 月 May	36.60±0.77d	241.47±24.12d	6.59±0.57d	27.76±0.29c	208.64±17.77d	7.52±0.72d
6 月 June	29.48±0.44e	306.08±26.77cd	10.38±0.86c	24.17±1.27d	228.13±6.50cd	9.46±0.59cd
7 月 July	25.51±0.62f	363.83±50.18c	14.29±2.26b	24.05±0.82d	209.39±9.61d	8.71±0.45d
8 月 August	31.96±0.19e	384.20±22.33c	12.02±0.64bc	19.82±0.45e	238.62±8.65cd	12.04±0.20b
9 月 September	44.75±0.90c	564.70±54.37b	12.61±1.01bc	23.96±0.77d	275.97±19.28c	11.52±0.83bc
10 月 October	61.70±5.04b	1 243.20±123.11a	20.32±3.47a	38.22±2.88b	424.66±35.90b	11.19±1.75bc
11 月 November	68.15±1.79a	1 294.25±49.96a	18.99±0.62a	45.18±2.69a	745.66±59.89a	16.59±2.24a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

3 讨论和结论

生物量增长是植物通过吸收无机养分进行光合作用实现的, 湿地植物地上部生物量的大小是衡量湿地生态系统生产力的重要标志之一^[15-16]。芦苇和香蒲地上部生物量随季节变化而变化, 芦苇地上部生物量从 5 月份开始迅速增加, 9 月份地上部生物量达到峰值, 之后随着降雨量的减少和温度的降低芦苇生物量逐渐降低。而香蒲地上部生物量从 7 月份起增长速率加快, 10 月份地上部生物量最大, 之后迅速降低。供试 2 种湿地植物地上部生物量的季节变化趋势基本一致, 都为典型的单峰型曲线。芦苇地上部生物量最大值 $2\ 480\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 这一结果与闽江河口湿地^[16]和杭州湾滨海湿地^[6]相近, 但远低于梦清园人工湿地^[17]; 香蒲地上部生物量最大值 $1\ 720\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 略低于刘宵等^[8]在人工湿地植物生长特性的研究结果。

芦苇和香蒲地上部 N 含量分别为 $6.13 \sim 14.70$ 和 $7.23 \sim 18.70\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 芦苇地上部 N 含量略低于崇明东滩湿地的芦苇^[18], 香蒲地上部 N 含量高于南四湖湿地的香蒲^[7]。芦苇和香蒲地上部 P 含量分别为 $0.31 \sim 1.63$ 和 $0.59 \sim 1.85\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 芦苇地上部 P 含量略低于梦清园人工湿地的芦苇^[17], 香蒲地上部 P 含量低于南四湖湿地的香蒲^[7]。芦苇和香蒲地上部 P 含量随着季节推移呈逐渐降低的趋势, 与吴爱平等^[19]对长江中游浅水湖泊水中芦苇和香蒲 P 含量变

化趋势的研究结果一致; 特别是在春季 P 含量显著高于其他季节, 说明湿地植物在生长初期对 P 的需求较高。与地上部 P 含量变化趋势不同的是, 在生长季节内芦苇和香蒲地上部 N 含量呈波动变化。刘颖等^[20]认为: 芦苇 N 含量在生长初期最大, 随着季节推移逐渐降低。而本研究结果表明: 芦苇地上部 N 含量在生长季节中总体呈先升高后下降的趋势。此外, 还有研究者认为湿地植物体内 N 和 P 含量具有年份和季节间的累积特点^[7]。在生长期内, 芦苇和香蒲地上部 N 含量极显著高于 P 含量, 说明芦苇和香蒲对 N 的吸收强于对 P 的吸收, 与段晓男等^[21]对乌梁素海芦苇 N 和 P 吸收的研究结果一致。

芦苇和香蒲地上部 N 和 P 积累量季节差异明显。2 种植物最大 N 积累量以芦苇较高, 而最大 P 积累量以香蒲较高。其中芦苇地上部 N 和 P 积累量的最大值均出现在 8 月份, 分别为 22.23 和 $1.85\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 略高于闽江河口湿地芦苇 N 和 P 总积累量^[16]; 香蒲地上部 N 和 P 积累量的最大值均出现在 9 月份, 分别为 21.83 和 $1.90\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于刘宵等^[8]对人工湿地香蒲 N 和 P 总积累量的测定结果。植物 N 和 P 积累量的季节变化主要与其地上部生物量季节变化有关, 与植物的物候期相符^[22]。

植物的 N/P 比可以用来说明限制生长的营养因子。一般来说, 当 N/P 比小于 14 时, N 是植物生长的限制因子; 而 N/P 比大于 16 时, P 是植物生长的限制因子^[23]。芦苇和香蒲在生长初期和中期受 N 限制、

生长末期受P限制,供试的芦苇和香蒲生长主要受N限制。芦苇和香蒲地上部C/N、C/P和N/P比在不同生长时期差异较大,在整个生长季节的变化规律也存在明显差异,与牛得草等^[24]的研究结果一致。

芦苇和香蒲地上部N和P积累量与生物量间的相关性显著,而与N和P含量间的相关性不显著,说明2种植物N和P积累量主要取决于其生物量,而不是N和P含量,与曾从盛等^[25]的研究结果一致。同时,植物体内N含量远高于P含量,因此植物对N的富集能力极显著高于对P的富集能力,这也说明植物在初级生产中对N的需求量远大于P。

湿地植物芦苇和香蒲可以吸收水体中的N和P从而净化水质,通过收割植株地上部可以从湿地中一次性移除部分N和P。湿地植物收割对富营养化湿地修复的贡献可用收割带走的N和P总量表示。研究表明:供试芦苇和香蒲长成后分别于8月份和9月份收割,水体中N和P去除量最大,此时收割能充分发挥2种植物去除N和P的功能。

参考文献:

- [1] BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plant: the root-zone method[J]. *Water Science and Technology*, 1987, 19: 107-118.
- [2] KASEVA M E. Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing per-treated wastewater: a tropical case study[J]. *Water Research*, 2004, 38: 681-687.
- [3] 李林峰, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(3): 337-342.
- [4] 崔丽娟, 李伟, 张曼胤, 等. 不同湿地植物对污水中氮磷去除的贡献[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(2): 203-208.
- [5] 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 597-601.
- [6] 吴统贵, 吴明, 萧木奎, 等. 杭州湾滨海湿地芦苇生物量及N、P储量动态变化[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(10): 1408-1412.
- [7] 郭长城, 胡洪营, 李锋民, 等. 湿地植物香蒲体内氮、磷含量的季节变化及适宜收割期[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1020-1025.
- [8] 刘宵, 黄岁樑, 唐婷芳子, 等. 人工湿地植物生长特性及其对氮磷富集能力研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(5): 1-5.
- [9] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 茭草、芦苇与水葫芦的污染物释放规律[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(5): 554-557.
- [10] 盛婧, 郑建初, 陈留根, 等. 基于富营养化水体修复的凤眼莲放养及采收条件研究[J]. *植物资源与环境学报*, 2011, 20(2): 73-78.
- [11] MEULEMAN A F M, Van LOGTESTIJN R, RIJS G B J, et al. Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used for wastewater treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20: 31-44.
- [12] 张林海, 曾从盛, 全川. 闽江河口湿地芦苇和互花米草生物量季节动态研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(2): 25-33.
- [13] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 645-646.
- [14] GÜSEWELL S, KOERSELMAN W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2002, 5: 37-61.
- [15] COLE C A, BROOKS R P, WARDROP D H. Assessing the relationship between biomass and soil organic matter in created wetlands of central Pennsylvania, USA[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 17: 423-428.
- [16] 章文龙, 曾从盛, 张林海, 等. 闽江河口湿地植物氮磷吸收效率的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1317-1322.
- [17] 吴淑杭, 徐亚同, 姜震方, 等. 梦清园人工湿地芦苇的氮磷和生物量动态及其适宜收割期的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6): 1594-1597.
- [18] 闫芊, 何文珊, 陆健健. 崇明东滩湿地植被演替过程中生物量与氮含量的时空变化[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1019-1023.
- [19] 吴爱平, 吴世凯, 倪乐意. 长江中游浅水湖泊水生植物氮磷含量与水柱营养的关系[J]. *水生生物学报*, 2005, 29(4): 406-412.
- [20] 刘颖, 王德利, 韩士杰, 等. 不同放牧率下羊草和芦苇可溶性碳水化合物和氮素含量的变化[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2167-2170.
- [21] 段晓男, 王效科, 欧阳志云, 等. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(2): 246-251.
- [22] 何太蓉, 杨永兴. 三江平原湿地植物群落P、K的积累、动态及其生物循环[J]. *海洋与湖沼*, 2006, 37(2): 178-183.
- [23] TESSIER J T, RAYNAL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40: 523-534.
- [24] 牛得草, 李茜, 江世高, 等. 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片C:N:P化学计量比的季节变化[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 317-325.
- [25] 曾从盛, 张林海, 全川. 闽江河口湿地短叶荳蔻氮、磷含量与积累量季节变化[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(5): 788-794.

(责任编辑: 张明霞)