

DOI: 10.5846/stxb201707131273

白秀玲,周云凯,王杰华,李文丽.鄱阳湖湿地灰化苔草生长季氮磷含量与储量的变化.生态学报,2018,38(13): - .

Bai X L, Zhou Y K, Wang J H, Li W L. Nitrogen and phosphorus concentration, and storage dynamics of *Carex cinerascens* during the spring growing season in Poyang Lake wetland. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

鄱阳湖湿地灰化苔草生长季氮磷含量与储量的变化

白秀玲^{1,2}, 周云凯^{1,2*}, 王杰华^{1,2}, 李文丽^{1,2}

1 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004

2 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

摘要:湿地植物在营养元素生物地球化学循环过程中起着重要作用,研究植物氮磷元素的吸收、分配和积累特征对于正确理解氮磷循环关键过程及其生态作用具有重要意义。基于野外实地观测和室内实验分析,研究了鄱阳湖淡水湿地灰化苔草春草生长季内不同部位生物量、氮磷含量及氮磷储量的动态变化。结果表明:在生长季内,灰化苔草各部位生物量随时间推移而增加,地上部分生物量在各生长期均高于地下部分,地下部分生物量积累速率相对稳定,而地上部分和总体平均积累速率表现为生长前期高于生长后期;各部位氮磷含量经历了先减少再增加的变化过程,其中地上部分氮元素在灰化苔草生长的中后期显著高于地下部分,而磷元素在中前期两者差异更为显著;生物量与氮磷储量均呈显著正相关,是灰化苔草氮磷储量动态变化的主导因子,氮磷元素主要储存在灰化苔草的地上部分;研究期间灰化苔草平均氮磷比介于 3.32—3.83 之间,按营养限制理论进行判断,氮元素可能是灰化苔草生长的限制性营养因子。

关键词:氮磷含量;氮磷储量;生物量;灰化苔草;鄱阳湖湿地

Nitrogen and phosphorus concentration, and storage dynamics of *Carex cinerascens* during the spring growing season in Poyang Lake wetland

BAI Xiuling^{1,2}, ZHOU Yunkai^{1,2*}, WANG Jiehua^{1,2}, LI Wenli^{1,2}

1 Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Wetland plants play an important role in the biogeochemical cycling of nutrients. Studying the absorption, distribution, and accumulation of nitrogen (N) and phosphorus (P) in plants is of great significance in understanding the key processes of nutrient cycling and their ecological functions. Therefore, field observations and laboratory measurements were used to study the dynamic changes in biomass as well as the N and P contents and their storages in *Carex cinerascens* in the spring growing season in Poyang Lake wetland. The results showed that there was a time-dependent increase in the biomasses of different components of *C. cinerascens* during the spring growing season whereas the aboveground biomass was higher than that of the belowground in each growing period. Furthermore, the accumulation rate of the belowground biomass was relatively constant whereas that of the aboveground and total biomasses was higher in the early growing stage than it was in the late growing stage. The N and P contents in the different parts of *C. cinerascens* decreased from March to April and then increased from April to May. The N content of the aboveground part was higher than that of the belowground part in each growing period, and the difference was significant in April and May ($P < 0.01$). The P content had similar distribution characteristics to those of the N content, but the difference was more significant in March and April ($P < 0.01$) than it was in other months. The N and P storages in *C. cinerascens* showed a significantly positive correlation with the

基金项目:国家自然科学基金(41371450,41101089);河南省高等学校青年骨干教师项目(2014GGJS-025)

收稿日期:2017-07-13; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ykzhou2009@126.com

biomass ($P < 0.01$), and their dynamics were determined based on the biomass variation of *C. cinerascens*. Further, the aboveground part of *C. cinerascens* contained the main N and P pools. The N/P ratio is an important ecological indicator that can be used to detect the nutrient limitation. Based on the theory of nutrient limitation, N may be a key nutrient factor that limits the primary productivity of *C. cinerascens*.

Key Words: nitrogen and phosphorus contents; nitrogen and phosphorus storages; biomass; *Carex cinerascens*; Poyang Lake wetland

湿地作为生源要素重要的“源”、“汇”和“转化器”^[1],其内部各元素的迁移转化与积累能力影响着湿地生物地球化学循环的进程^[2-3],进而影响着湿地生态系统的结构和功能^[4-5]。氮磷是湿地植物生长不可缺少的营养元素,也是湿地生态系统生产力的重要限制性因子和水体富营养化的主要原因^[6-7]。湿地植物从土壤、水体等环境中吸收氮磷等营养物质以支持自身生长,并将其转化后固定在植物有机体中,植物死亡后经分解、淋洗等过程又会将固定的氮磷等物质归还到环境当中^[8]。植物有机体通过吸收、分配、积累和归还等过程参与到氮磷的生物地球化学循环,是整个循环体系当中的重要环节,其作用方式和强度对于促进、延缓或遏制湿地生态环境恶化具有重要作用^[3, 9-10]。

针对湿地植物氮磷分配、积累和生物循环方面,许多学者已开展部分研究,如 Wang 等^[11]研究了三江平原毛茛草(*Carex lasiocarpa*)氮磷含量和积累量的季节变化特征;郭雪莲等^[12]则研究了小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)和毛茛草三种典型植物群落氮的积累与分配模式;曾从盛等^[9, 13]研究了闽江河口芦苇(*Phragmites australis*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)以及短叶荇菜(*Cyperus malaccensis*)氮磷含量、生物量的动态变化及植物生产力的限制因子;吴春笃等^[14-15]研究了北固山湿地藨草(*Phalaris arundinacea*)和芦苇对氮磷的吸收与积累能力;邵学新等^[16]则对杭州湾潮滩湿地芦苇、互花米草和海马三稜草(*Scirpus mariqueter*)3种优势植物的氮磷含量与储量变化进行了研究。从已有的研究成果来看,当前研究更多集中在淡水沼泽湿地植物和滨海盐沼湿地植物,而对淡水湖泊湿地植物研究相对较少。开展淡水湖泊湿地植物氮磷营养元素的吸收、分配模式、迁移转化与积累特征研究,对于丰富和完善湿地氮磷养分循环理论、进一步正确理解湿地生物地球化学循环关键过程及其生态作用具有重要意义。

鄱阳湖湿地是我国最大的淡水湖泊湿地,受长江及流域“五河”(赣江、抚河、饶河、修水、信江)来水的共同影响,水位年内波动剧烈、变幅巨大,洲滩干湿交替频繁。这种独特的水文节律形成了芦苇(*Phragmites australis*)、南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)、灰化苔草(*Carex cinerascens*)和藨草(*Phalaris arundinacea*)等湿地植物的带状分布格局和特有的生长发育过程^[17-18],同时也使氮磷等营养物质在湿地生态系统中具有很大的流动性^[19]。当前,鄱阳湖湿地植物研究主要集中于植物群落的分布^[20-21]、空间格局^[22-23]以及植物生长发育与水文变化之间的关系^[24-25],而关于植物体营养元素的动态变化还鲜有报道。开展鄱阳湖湿地植物生长季内不同发育阶段营养元素的吸收、分配及转移特征研究,有助于进一步认识鄱阳湖湿地植物的生态功能及其在区域营养物质循环体系当中所起的生态作用。本文选取鄱阳湖湿地洲滩优势植物——灰化苔草作为研究对象,通过对灰化苔草春草生长季内氮磷含量与储量动态变化进行研究,以期揭示高变幅水位波动背景下鄱阳湖湿地植物的养分利用、分配模式和变化特征,为深入了解淡水湖泊湿地氮磷养分循环的关键过程和运行机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖湿地地处江西省北部,长江中下游南岸,地理位置 24°29'14"—30°04'41"N、113°34'36"—118°28'58"E。在长江和流域“五河”来水的共同作用下,水位年内波动频繁,呈现出丰水期和枯水期交替出现的独特水文节

律^[26]。该区在气候上属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,多年平均气温 16.5—17.8℃,平均降水量 1350—1700 mm^[27]。良好的水热条件使鄱阳湖湿地成为我国生物多样性最为丰富的地区之一^[28]。湿地植被沿高程形成的水分梯度呈较为明显的带状或环带状分布,从湖岸向湖心方向依次分布着芦苇、南荻、灰化苔草和藴草等植物群落,其中灰化苔草分布最广、面积最大,是鄱阳湖湿地洲滩最为主要的湿生植物^[29],分为春草和秋草,一般每年 2—5 月为春草的萌发生长期,在丰水期春草易被湖水淹没,大量死亡或进入休眠状态;秋草则在秋季退水期洲滩出露后开始生长,一般 9—12 月为萌发生长期,次年 1—2 月枯萎^[30]。

1.2 样品采集与处理

本研究选取星子县城南部落星墩附近灰化苔草集中分布区作为野外观测样地。样地内灰化苔草群落为单一优势种群落,灰化苔草个体数目和生物量占到群落总量的 95% 以上,群落内偶有水田碎米荠(*Potrantilla limprichtii*)、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、下江委陵菜(*Cardaminelyrata*)等伴生种出现。灰化苔草主要分布在 12—15 m 高程带上,不同高程带由于水分等环境条件的差异,灰化苔草群落特征有所不同。低滩位(12—13 m 高程带)长期处于过度湿润或水淹状态,成熟期株高仅 30—50 cm,群落盖度 50%—70%;中滩位(13—14 m 高程带)在灰化苔草生长季的中后期遭受间歇性水淹,株高可达 60—100 cm,群落盖度 80%—100%;而高滩位(14—15 m 高程带)在灰化苔草成熟期才开始经历水淹,株高为 70—110 cm,群落盖度 90%—100%。考虑到不同高程带水文条件和灰化苔草长势差异,本研究在样地内布设 2 条样带,在每条样带的不同高程带(低、中、高滩位)各布设 1 个 1 m×1 m 的样方,用 GPS 确定各样方的地理位置。在春草生长季内每月采样一次,分别于 2015 年 3 月 2 日(幼苗期)、4 月 3 日(花期)和 5 月 2 日(成熟期)采集植物样品,花期和成熟期采样均将上次样方沿同高程略作平移,以避免重复采样对结果造成的干扰,每次共计采集 6 个样品。采样时统计各样方的灰化苔草密度,在样方内按对角线法用剪刀齐地面剪下 9 株灰化苔草地上部分(包括已枯的叶片),并用小铁锹挖掘其地下根系^[31],装入密封袋中,带回实验室清水冲洗泥沙等杂物,晾干后用精度为 0.01 g 的电子天平分别称量地上与地下部分鲜重,之后将其置于鼓风干燥箱中 80℃ 下烘干至恒重,并分别称其干重,最后将烘干样品进行粉碎、研磨,过 100 目筛后装密封袋内保存,用于测定植物体的氮磷含量。

1.3 测定方法与计算

将粉碎后的植物样品用硫酸-高氯酸($H_2SO_4-HClO_4$)进行消煮,分别采用凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定全氮和全磷含量^[32]。氮、磷储量计算公式如下:

$$M_N = T_N \times B; \quad M_P = T_P \times B$$

其中, M_N 、 M_P 分别为氮、磷储量(g/m^2); T_N 、 T_P 为单位生物量(干重)的氮、磷含量(g/kg); B 为单位面积的干重生物量(kg/m^2)^[33]。

利用每次采样各样方测得的 9 株灰化苔草生物量计算出单株生物量,乘以密度后,换算成各样方单位面积生物量,并求其平均值和标准差,以平均值±标准差作为该生长期灰化苔草生物量的统计值($n=6$);将每次各样方 9 株灰化苔草测算的氮磷含量和氮磷储量分别计算其平均值和标准差,以平均值±标准差作为该生长期灰化苔草氮磷含量和氮磷储量的统计值($n=6$)。

1.4 数据统计分析

利用 Excel 2007 进行数据分析;采用相关分析确定灰化苔草生物量、氮磷含量与氮磷储量之间的相关性;通过 t -test 方法分别比较灰化苔草地上与地下部分的生物量、氮磷含量及氮磷储量之间的差异。

2 结果与分析

2.1 灰化苔草生物量变化

调查期间,灰化苔草地上部分、地下部分和总生物量的变化范围分别为 0.69—4.71、0.60—4.19 kg/m^2 和 1.29—9.90 kg/m^2 (图 1),各部分生物量在春草生长季内动态变化一致,均随时间的推移而逐渐增加,最大值出现在成熟期(5 月),地上、地下与总生物量平均值分别达到 (4.24 ± 0.29) 、 (3.90 ± 0.21) 、 (8.14 ± 0.49) kg/m^2 ;

灰化苔草在不同生长期的地上生物量均高于地下生物量,但在幼苗期,其地上和地下生物量之间的差异不显著($P>0.05$),而在花期和成熟期时,两者差异分别达到了极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。在不同生长阶段,灰化苔草各部分生物量积累速率不同,其中地上部分在生长前期(3—4月)生物量积累速率为 $0.07 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,明显高于生长后期(4—5月)的 $0.04 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$;地下生物量则在整个生长季内保持相对稳定的积累速率,为 $0.05 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$;而总生物量积累速率表现为生长前期($0.12 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)高于生长后期($0.09 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)。

2.2 灰化苔草氮磷含量变化

在灰化苔草春草生长季内,地上部分、地下部分和总体平均的氮含量变化范围分别为 $12.66\text{—}17.56$ 、 $9.21\text{—}16.96 \text{ g/kg}$ 和 $11.35\text{—}17.28 \text{ g/kg}$ (图 2a),各部位的氮含量动态变化趋于一致,最大值出现在幼苗期(地上部分: $(16.65\pm0.75) \text{ g/kg}$;地下部分: $(16.27\pm0.75) \text{ g/kg}$;总体: $(16.47\pm0.75) \text{ g/kg}$),而最小值则出现在花期(地上: $(13.36\pm0.63) \text{ g/kg}$;地下: $(9.79\pm0.42) \text{ g/kg}$;总体: $(11.86\pm0.48) \text{ g/kg}$)。在不同生长期,地上部分的氮含量均大于地下部分,其中幼苗期两者差异不显著($P>0.05$),而花期和成熟期两者均达到了极显著差异($P<0.01$)。

调查期间,灰化苔草磷含量显著低于同部位的氮含量($P<0.01$),其地上部分、地下部分和总体平均的磷含量变化范围分别为 $3.01\text{—}5.21$ 、 $2.85\text{—}5.08 \text{ g/kg}$ 和 $2.95\text{—}5.15 \text{ g/kg}$ (图 2b),各部位磷含量的动态变化与氮元素一致,最大值出现在幼苗期,而最小值则出现在花期,地上部分磷含量在各生长期均大于地下部分, t -test 分析结果显示,幼苗期和花期两者均达到了显著差异($P<0.05$),而成熟期差异不显著($P>0.05$)。

相关分析表明,生长季内灰化苔草地上部分、地下部分和总体平均氮磷含量与相应部位的生物量呈显著负相关关系($P<0.01$)(图 3)。

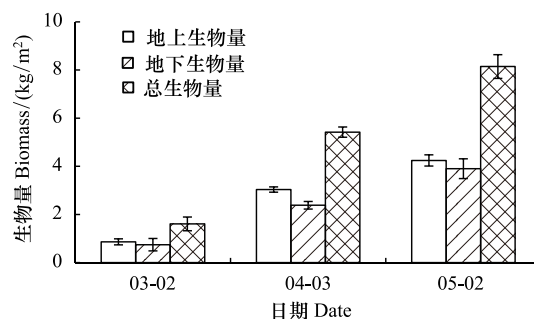


图 1 灰化苔草各部位生物量动态变化

Fig.1 Dynamic variations of aboveground, belowground and total biomass of *Carex cinerascens*

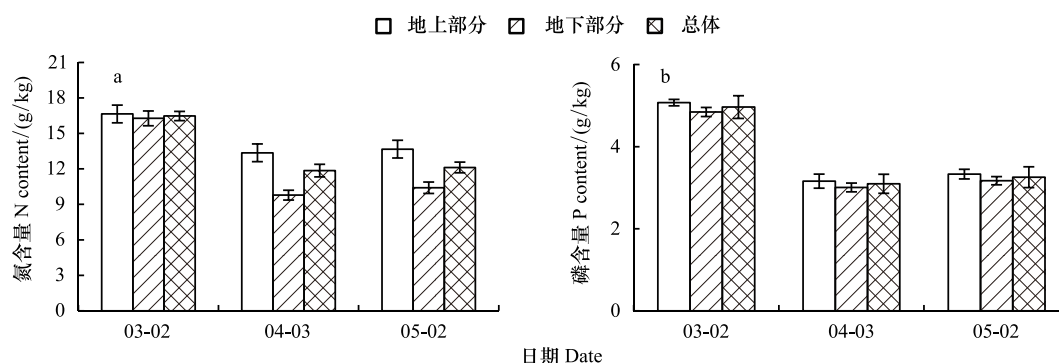


图 2 灰化苔草氮磷含量动态变化

Fig.2 Dynamic variations of nitrogen (N) and phosphorus (P) contents in aboveground, belowground and total components of *Carex cinerascens*

2.3 灰化苔草氮磷储量变化

灰化苔草地上部分、地下部分及总体平均的氮储量均随时间推移不断增加(图 4a),至成熟期达到最大值,分别为 (14.35 ± 1.60) 、 $(9.83\pm1.13) \text{ g/m}^2$ 和 $(24.19\pm2.70) \text{ g/m}^2$,地上部分是其主要储存部位,占灰化苔草氮总储量的 54%—65%,但地上与地下部分氮储量在幼苗期差异不显著($P>0.05$),而在花期和成熟期达到极显著差异($P<0.01$)。

灰化苔草各部位磷储量的变化特征与氮储量相同,在成熟期达到最大值(地上部分: $(3.51\pm0.58) \text{ g/m}^2$;

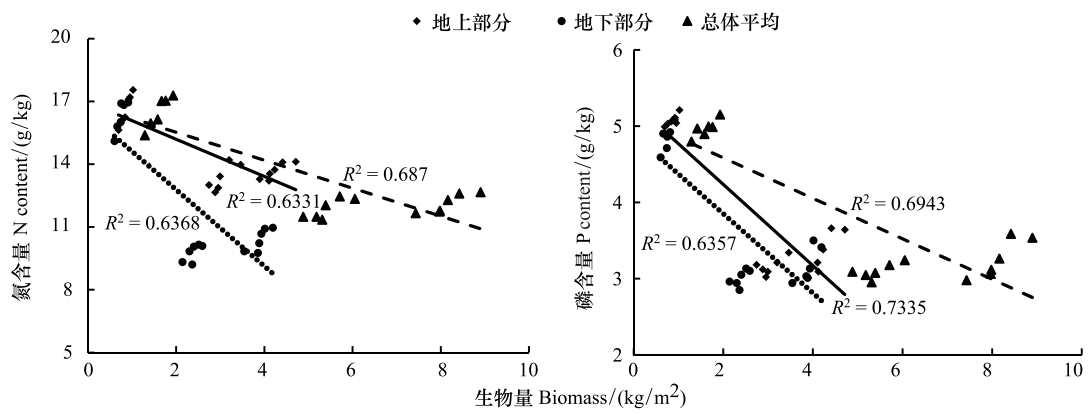


图3 灰化苔草氮磷含量与生物量相关关系

Fig.3 Relationship between nitrogen and phosphorus contents with biomass of *Carex cinerascens*

地下部分: $(3.00 \pm 0.41) \text{ g/m}^2$; 总体: $(6.51 \pm 0.98) \text{ g/m}^2$ (图 4b)。各生长期灰化苔草地上部分磷储量略高于地下部分, 占到磷总储量的 54%—59%, 在幼苗期和成熟期两者并未形成显著差异 ($P > 0.05$), 而花期两者差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。总体来看, 灰化苔草各部位磷储量显著低于氮储量 ($P < 0.01$)。

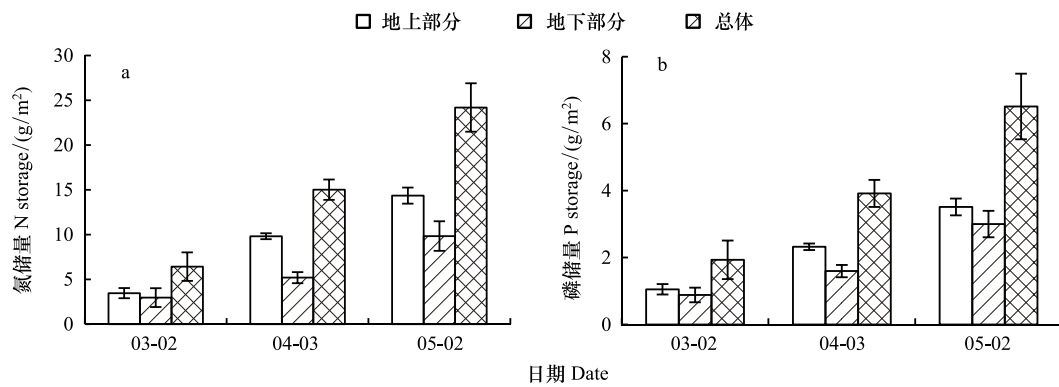


图4 灰化苔草氮磷储量动态变化

Fig.4 Dynamic variations of nitrogen and phosphorus storages in aboveground, belowground and total components of *Carex cinerascens*

灰化苔草氮磷储量主要受植物体生物量和氮磷含量的影响, 相关分析表明, 灰化苔草各部位氮磷储量与生物量呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), 而与相同部位的氮磷含量呈显著负相关关系 ($P < 0.01$) (图 5)。从回归系数来看, 灰化苔草生物量对氮磷储量的影响更为明显。

2.4 灰化苔草氮磷比(N/P)

灰化苔草不同部位 N/P 变化有一定差异 (表 1), 地上部分与总体平均 N/P 经历先增大再减小的变化过程, 最小值出现在幼苗期; 而地下部分 N/P 的变化过程则相反, 幼苗期 N/P 最大, 而花期 N/P 最小, 但变化幅度较小, 基本稳定维持在 3.26—3.36 之间。从不同部位的对比来看, 幼苗期地上部分 N/P 略小于地下部分, 但两者差异并不显著 ($P > 0.05$); 而花期和成熟期地上部分 N/P 显著高于地下部分 ($P < 0.01$)。

表 1 灰化苔草 N/P 变化

Table 1 Dynamic variations of N/P ratio in aboveground, belowground and total components of *Carex cinerascens*

生长期 Growing period	地上部分 Aboveground	地下部分 Belowground	总体平均 Total
幼苗期(3月)Seedling period (March)	3.28	3.36	3.32
花期(4月)Flowering period (April)	4.23	3.26	3.83
成熟期(5月)Maturing period (May)	4.10	3.28	3.72

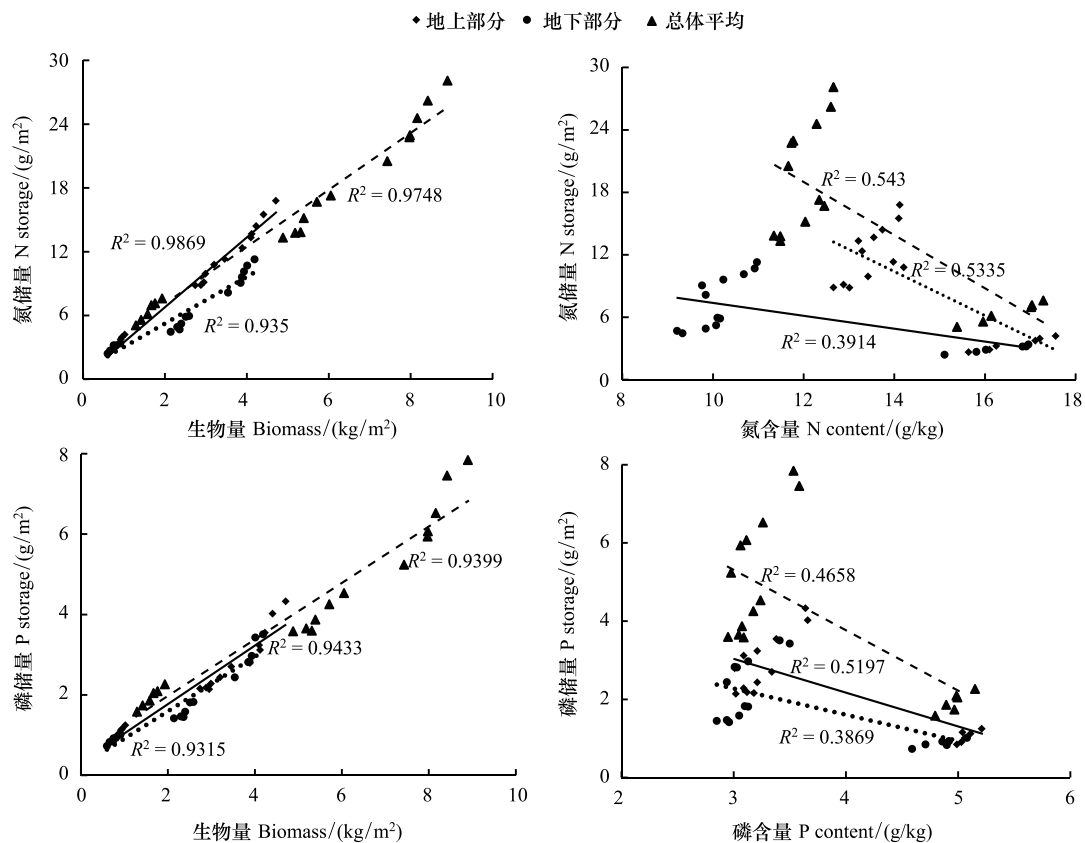


图5 灰化苔草氮磷储量与生物量、氮磷含量相关关系

Fig.5 Relationship between nitrogen and phosphorus storages with biomass, nitrogen and phosphorus contents of *Carex cinerascens*

3 讨论

3.1 灰化苔草氮磷含量差异

氮磷元素是构成湿地植物有机体的重要营养元素^[34],不同的植物种类、不同生长期以及不同的生境条件下,植物体内的氮磷含量会表现出一定差异^[6, 33, 35-36],这种差异是植物生长节律、光合作用、温度、水分及土壤养分等因素综合作用的结果^[37]。

鄱阳湖湿地灰化苔草受自身生长特性和环境条件的影响,植物体内的氮磷含量随时间变化表现出一定的规律性,各部位均经历先减少再增加的变化过程。在灰化苔草生长初期(3月初),植物体需要吸收大量的氮磷元素来合成蛋白质和核酸以维持生长所需,此时无论地上部分还是地下部分,其氮磷含量均较高;之后随着气温的升高、降水的增多以及湖水位的抬升,湿地水热条件得到明显改善,植物的同化作用显著增强,灰化苔草进入快速生长期,生物量积累大幅增加,但此时的植物根系尚不够发达,吸收氮磷营养元素的能力还较为有限,植物体内的氮磷含量受“稀释效应”的影响而表现出明显下降(图2);而到5月份的生长末期,灰化苔草已达到成熟阶段,此时鄱阳湖开始进入丰水期,频繁的水淹和半水淹过程使灰化苔草生长放缓甚至停止,但水淹可增加土壤中可溶性营养物质的移动性^[38],植物体可通过调节体内的生理机制持续地吸收、供应营养元素来应对水淹缺氧造成的环境胁迫^[39],此外,该期间植物体也开始逐渐蓄积养分以待下季生长所需,导致该阶段灰化苔草氮磷含量又出现回升,但低于生长初期的氮磷含量。

植物器官本身的结构和功能的差异会影响到氮磷等营养元素在植物体内的分配^[40]。叶是植物光合作用的主要器官,新陈代谢过程中需要大量的氮磷营养元素;而根是氮磷元素的吸收和贮藏器官,担负着供给地上部分养分任务^[41],通常,湿地植物在生长季内会将大部分的营养元素转移到地上器官中,导致植物体地上

部分氮磷含量高于地下部分^[39]。灰化苔草与大多数湿地植物具有相同的特点,地上部分的氮磷含量在整个春草生长季内均高于地下部分,但不同生长期两者差异程度有所区别,氮含量在生长季的中后期(4月和5月)两个部位差异较为显著,而磷元素在生长季的中前期(3月和4月)差异更为显著,这种分配格局的差异可能与氮磷养分的生理功能以及灰化苔草的生态适应策略有关。氮元素是构成植物体蛋白质的主要成分,可促进叶绿素的形成和光合作用的进行;而磷元素在植物体内常与其他有机物结合形成磷脂、核酸和辅酶等,能够提高植物的抗寒性和抗旱性,并有利于花果的形成^[42-43]。在春草生长季的中前期,灰化苔草将吸收的磷更多地分配到地上部分,以此来应对生长初期的低温和水分缺乏等环境因素的限制,并使灰化苔草能够在生长季中段正常进入花期;而在生长季的中后期,灰化苔草则将吸收的氮元素更多地向地上部分转移,其作用主要在于促进叶绿素的形成和植株的伸长生长,使灰化苔草尽早步入成熟期,以完成其春草生长周期,这可能是灰化苔草应对生长季中后期频繁水淹和半水淹所采取的一种生态适应策略。可见,灰化苔草在不同生长期的氮磷含量变化及不同部位间差异,一定程度上反映了灰化苔草对鄱阳湖区特定水热环境所形成的生态适应性。

3.2 灰化苔草氮磷储量差异

湿地植物生长发育过程即是能量的固定过程,也是营养元素的积累过程。植物营养元素的积累与储存对于维持湿地生态系统的结构和功能起着重要作用^[35]。影响湿地植物营养元素积累的因素主要是植物生物量和营养元素含量。研究期间,虽然灰化苔草各部位氮磷含量经历先减小再增大的变化过程,但其氮磷储量却随时间推移而不断增加,与灰化苔草生物量的变化过程相一致,相关分析也显示,不同生长期灰化苔草各部位的氮磷储量与生物量呈显著正相关($P<0.01$),而与氮磷含量呈负相关($P<0.01$),这表明生物量是决定灰化苔草氮磷储量动态变化的最主要因素。从氮磷含量来看,灰化苔草地上与地下部分对氮的富集能力明显强于对磷的富集能力,因此,在不同生长期灰化苔草各部位的氮储量均要高于磷储量。

在灰化苔草的不同生长期,其生物量在不同部位间的分配存在一定差异,而且不同部位对氮磷的需求和富集能力也不尽相同,总体而言,地上部分的生物量及氮磷含量在各生长期均高于地下部分,地上部分成为灰化苔草氮磷最主要的储存部位,其氮磷储量分别占到总储量的54%—65%和54%—59%。该部分固定的氮磷营养元素除一小部分随枯落物保存在湿地土壤中,大部分会在丰水期随着灰化苔草地上部分的腐烂分解释放到水体中,一定程度上增加了鄱阳湖水体的营养盐负荷。

3.3 灰化苔草生长的限制性营养因子

氮磷元素是湿地植物生长重要的限制性营养因子^[33]。植物体内的氮磷比是具有重要生态意义的指标,通过氮磷比可反映植被的结构和功能特征,也能够反映群落水平的营养限制状况^[44-45]。Koerselman 等对欧洲沼泽湿地植物研究发现,当氮磷比 >16 时,植物生长会受到磷的限制;当氮磷比 <14 时,受到氮的限制;而当氮磷比在14—16之间,则氮和磷同时限制植物的生长^[46]。不同生境条件下,湿地植物氮磷比差异较大,其限制性养分不尽相同。胡伟芳等通过对中国主要湿地植物氮磷含量进行研究,结果显示,河流湿地和湖泊湿地植物的氮磷比较低,多为氮限制,而滨海湿地植物氮磷比较高,多为磷限制,这种差异的原因可能与湿地的水文条件以及生境氮磷的有效性有关^[45]。本研究中,鄱阳湖湿地灰化苔草在生长季内氮含量高于磷含量,但总体平均氮磷比偏低,其值在3.32—3.83之间,低于三江平原的小叶章^[36]、闽江河口的短叶荳蔻^[9]、互花米草^[13]等湿地植物。若按上述标准进行判断,鄱阳湖湿地灰化苔草在生长过程中表现为磷元素相对过剩,而氮元素相对缺乏,氮可能是灰化苔草生长的限制性营养因子。在鄱阳湖湿地,灰化苔草分布的洲滩受湿地水位波动的影响,干湿交替频繁,土壤脱氮作用较为强烈^[47],可被植物吸收利用的有效氮磷养分(尤其是氮)易随地表径流和地下径流发生淋溶流失,导致土壤中氮磷元素含量总体偏低,但由于土壤中磷除了动植物残体归还外,更大程度上来源于成土母质的矿化分解,释放较为缓慢,也较氮元素更为稳定,其含量相对于氮元素保持在一个较高的水平^[37],受生境中氮磷养分的影响,灰化苔草生长发育过程中更可能受到氮缺乏的限制。值得注意的是, Koerselman 等提出的营养限制理论虽然为判断湿地植物生长的限制性养分提供了重要依据,但由于不同地区生境条件以及植物内在特性的差异,不同湿地植物的氮磷比临界阈值可能会发生改变,因此,利用这种

化学计量关系来判断植物生长的限制性养分还需要严格的野外施肥试验来进一步验证。

4 结论

(1) 在生长季内,鄱阳湖湿地灰化苔草各部位的生物量均随时间推移而逐渐增加,最大值出现在成熟期,地上部分生物量在各生长期均高于地下部分;但不同生长阶段,生物量积累速率有所不同,地上部分与总体平均表现为生长前期(3—4月)高于生长后期(4—5月),而地下部分则保持相对稳定的积累速率。

(2) 灰化苔草各部位的氮磷含量均经历了先减少再增加的变化过程。地上部分的氮磷含量在各个生长期均高于地下部分,但氮元素在生长的中后期(4月和5月)两者表现出显著差异,而磷元素则在生长的中前期(3月和4月)差异更为显著。

(3) 研究期间,灰化苔草各部位氮磷储量均随时间推移而增加,生物量是决定氮磷储量动态变化的最主要因素,但由于灰化苔草氮磷富集能力的差异,在各生长期灰化苔草不同部位氮储量均高于磷储量;地上部分是灰化苔草氮磷元素主要的储存部位。

(4) 灰化苔草氮磷比总体平均介于 3.32—3.83 之间,若按 Koerselman 等的营养限制理论进行判断,灰化苔草生长过程中磷元素相对过剩,而氮元素相对缺乏,氮元素可能是灰化苔草生长的限制性营养因子。

参考文献 (References):

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 2000.
- [2] 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. 生态学报, 2006, 25(9): 1019-1023.
- [3] 章文龙, 曾从盛, 张林海, 王维奇, 林燕, 艾金泉. 闽江河口湿地植物氮磷吸收效率的季节变化. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1317-1322.
- [4] Venterink H O, Pieterse N M, Belgers J D M, Wassen M J, De Ruiter P C. N, P, and K budgets along nutrient availability and productivity gradients in wetlands. Ecological Applications, 2002, 12(4): 1010-1026.
- [5] Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2002, 5(1): 37-61.
- [6] 鲁静, 周虹霞, 田广宇, 刘贵华. 洱海流域 44 种湿地植物的氮磷含量特征. 生态学报, 2011, 31(3): 709-715.
- [7] 王佳宁, 晏维金, 贾晓栋. 长江流域点源氮磷营养盐的排放、模型及预测. 环境科学学报, 2006, 26(4): 658-666.
- [8] 郭雪莲, 吕宪国, 郝敏. 植物在湿地养分循环中的作用. 生态学报, 2007, 26(10): 1628-1633.
- [9] 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. 生态学报, 2009, 28(5): 788-794.
- [10] 贾庆宇, 周广胜, 周莉, 谢艳兵. 湿地芦苇植株氮素分布动态特征分析. 植物生态学报, 2008, 32(4): 858-864.
- [11] Wang Y, Liu J S, Dou J X, Zhao G Y. Seasonal characteristics of *Carex lasiocarpa* biomass and nutrient accumulation in the typical wetland of Sanjiang Plain, China. Journal of Forestry Research, 2010, 21(3): 389-393.
- [12] 郭雪莲, 吕宪国. 三江平原湿地典型植物群落氮的积累与分配. 生态环境学报, 2012, 21(1): 59-63.
- [13] 曾从盛, 张林海, 全川. 闽江河口湿地芦苇和互花米草氮、磷养分季节动态. 湿地科学, 2009, 7(1): 16-24.
- [14] 吴春笃, 沈明霞, 储金字, 高平. 北固山湿地藨草氮磷积累和转移能力的研究. 环境科学学报, 2006, 26(4): 674-678.
- [15] 吴春笃, 石驰, 沈明霞, 王万俊. 北固山湿地植物对氮磷元素吸收能力的研究. 生态环境, 2007, 16(2): 369-372.
- [16] 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐. 杭州湾潮滩湿地 3 种优势植物碳氮磷储量特征研究. 环境科学, 2013, 34(9): 3451-3457.
- [17] 张全军, 于秀波, 胡斌华. 鄱阳湖南矶湿地植物群落分布特征研究. 资源科学, 2013, 35(1): 42-49.
- [18] Xu X L, Zhang Q, Tan Z Q, Li Y L, Wang X L. Effects of water-table depth and soil moisture on plant biomass, diversity, and distribution at a seasonally flooded wetland of Poyang Lake, China. Chinese Geographical Science, 2015, 25(6): 739-756.
- [19] 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付姗, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片、凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(7): 1898-1906.
- [20] 谭志强, 张奇, 李云良, 许秀丽, 姜加虎. 鄱阳湖湿地典型植物群落沿高程分布特征. 湿地科学, 2016, 14(4): 506-515.
- [21] 简敏菲, 徐鹏飞, 余厚平, 熊小英, 李林. 乐安河——鄱阳湖湿地植物群落分布及其环境影响因子. 环境科学研究, 2015, 28(3): 408-417.
- [22] 周云凯, 白秀玲, 宁立新. 鄱阳湖湿地苔草 (*Carex*) 景观变化及其水文响应. 湖泊科学, 2017, 29(4): 870-879.
- [23] 查东平, 冯明雷, 陈宏文, 刘足根, 廖兵, 申展. 鄱阳湖典型湿地植被景观格局的时空变化分析. 水生态学杂志, 2015, 36(5): 1-7.

- [24] 张丽丽,殷峻暹,蒋云钟,王浩. 鄱阳湖自然保护区湿地植被群落与水文情势关系. 水科学进展, 2012, 23(6): 768-775.
- [25] 冯文娟,徐力刚,王晓龙,李海英,姜加虎. 鄱阳湖洲滩湿地地下水位对灰化苔草种群的影响. 生态学报, 2016, 36(16): 5109-5115.
- [26] 戴雪,万荣荣,杨桂山,王晓龙. 鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系. 地理科学, 2014, 34(12): 1488-1496.
- [27] 刘肖利,丁明军,李贵才,齐述华,张起明. 鄱阳湖湿地植物群落沿高程梯度变化特征研究. 人民长江, 2013, 44(5): 82-86.
- [28] 游海林,徐力刚,姜加虎,许加星,邓建明,王晓龙. 鄱阳湖典型洲滩湿地植物根系生长对极端水情变化的响应. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3125-3130.
- [29] 吴琴,尧波,朱丽丽,辛瑞新,胡启武. 鄱阳湖典型苔草湿地生物量季节变化及固碳功能评价. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2): 215-219.
- [30] 胡振鹏,葛刚,刘成林,陈伏生,李述. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 597-605.
- [31] 吕晓龙. 鄱阳湖湿地灰化苔草——土壤系统氮磷变化特征研究[D]. 开封: 河南大学, 2014.
- [32] 郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [33] 刘存歧,李昂,李博,王军霞,张亚娟,刘莎. 白洋淀湿地芦苇生物量及氮、磷储量动态特征. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1503-1511.
- [34] 徐治国,何岩,闫百兴,任慧敏. 营养物及水位变化对湿地植物的影响. 生态学杂志, 2006, 25(1): 87-92.
- [35] 熊汉锋,黄世宽,陈治平,廖勤周,谭启玲,王运华. 梁子湖湿地植物的氮磷积累特征. 生态学杂志, 2007, 26(4): 466-470.
- [36] 孙志高,刘景双,王金达,秦胜金. 三江平原不同群落小叶章种群生物量及氮、磷营养结构动态. 应用生态学报, 2006, 17(2): 221-228.
- [37] 郑艳明,尧波,吴琴,胡斌华,胡启武. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征. 生态学报, 2013, 33(20): 6488-6496.
- [38] Cole C A. The assessment of herbaceous plant cover in wetlands as an indicator of function. Ecological Indicators, 2002, 2(3): 287-293.
- [39] Rubio G, Lavado R S. Acquisition and allocation of resources in two waterlogging-tolerant grasses. New Phytologist, 1999, 143(3): 539-546.
- [40] 孙崇玉,刘景双,王洋,郑娜,窦晶鑫,赵光影. 三江平原湿地小叶章各器官主要营养元素特征. 湿地科学, 2011, 9(2): 157-162.
- [41] 于帅,陈玮,何兴元,刘周莉,黄彦青. 浑河河岸带六种草本植物氮、磷含量特征. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2775-2780.
- [42] 陆景陵. 植物营养学(上)(第二版). 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [43] 王镜岩,朱圣庚,徐长法. 生物化学(上). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [44] Li F, Hu J Y, Xie Y H, Yang G S, Hu C, Chen X S, Deng Z M. Foliar stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in wetland sedge *Carex brevicuspis* along a small-scale elevation gradient. Ecological Indicators, 2017, doi: 10.1016/j.ecolind.2017.04.059.
- [45] 胡伟芳,章文龙,张林海,陈晓艳,林伟,曾从盛,全川. 中国主要湿地植被氮和磷生态化学计量学特征. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1041-1052.
- [46] Koerselman W, Meuleman A F. The vegetation N: P ratio; a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [47] 付姗,吴琴,尧波,聂兰琴,黄景裕,胡启武. 南矶湿地土壤碳、氮、磷化学计量比沿水位梯度的分布. 湿地科学, 2015, 13(3): 374-380.