

四种红树植物根茎叶的碳氮磷化学计量特征

樊月^{1,2} 潘云龙^{1,2} 陈志刚^{1,2} 林晗^{1,2} 徐冉^{1,2,3} 吴承祯⁴ 洪滔^{1,2*}

(¹福建农林大学林学院, 福州 350002; ²福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002; ³漳江口红树林国家级自然保护区, 福建漳州 363300; ⁴武夷学院, 福建南平 354300)

摘要 以漳江口红树林的秋茄 (*Kandelia candel*)、木榄 (*Bruguiera gymnorrhiza*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 和老鼠簕 (*Acanthus ilicifolius*) 为研究对象, 对其根、茎、叶中的碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 含量以及生态化学计量学特征进行分析。结果表明: 秋茄、桐花树、老鼠簕 3 种植物各器官中的 C 含量均表现为茎、叶显著大于根, 秋茄、木榄、桐花树 3 种植物的 N、P 含量均表现为叶 > 茎 > 根; 桐花树、老鼠簕不同器官的 C 含量变异系数均表现为根 > 叶 > 茎, 秋茄、木榄、老鼠簕 3 种植物 N 含量的变异系数均表现为根、茎大于叶, 秋茄、木榄、桐花树 3 种植物 P 含量的变异系数均表现为根、茎大于叶; 秋茄、木榄、老鼠簕 C : N 的变异系数为根、茎大于叶; 4 种植物中, 老鼠簕根、叶的 P 含量显著高于其他 3 种植物, 茎的 P 含量略高于其他 3 种植物, 根 C、N、P 与叶 C、P 的变异系数均大于其他 3 种植物; 4 种红树植物叶的 C : N : P 质量比 (151 : 9 : 1) 显著小于根 (187 : 4 : 1) 和茎 (239 : 5 : 1), 叶的 C、N 和 P 的生态化学计量特征相对稳定。分析红树植物不同器官养分元素间的分配规律, 可为大尺度的红树林生态化学计量学研究提供理论基础, 并为红树植物的保护与可持续经营提供科学依据。

关键词 红树林; 秋茄; 木榄; 桐花树; 老鼠簕; C : N : P 生态化学计量

C : N : P stoichiometry in roots, stems, and leaves of four mangrove species. FAN Yue^{1,2}, PAN Yun-long^{1,2}, CHEN Zhi-wei^{1,2}, LIN Han^{1,2}, XU Ran^{1,2,3}, WU Cheng-zhen³, HONG Tao^{1,2*} (¹College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ²Key Lab for Forest Ecosystem Processes and Management in Fujian Province, Fuzhou 350002, China; ³Zhangjiang Estuary Mangrove National Nature Reserve, Zhangzhou 363300, Fujian, China; ⁴Wuyi University, Nanping 354300, Fujian, China).

Abstract: We analyzed the C, N and P concentrations and stoichiometric ratios (C : N : P) in roots, stems, and leaves of *Kandelia candel*, *Bruguiera gymnorrhiza*, *Aegiceras corniculatum* and *Acanthus ilicifolius* in Zhangjiang Estuary, subtropical China. The C concentrations in stems and leaves were significantly higher than those in roots of *K. candel*, *A. corniculatum*, and *A. ilicifolius*. The N and P concentrations of *K. candel*, *B. gymnorrhiza*, and *A. corniculatum* were the highest in leaves, followed by stems and roots. In *A. corniculatum* and *A. ilicifolius*, the variation coefficient of stem C concentrations was significantly lower than that of roots and leaves. The variation coefficient of N concentration in *K. candel*, *B. gymnorrhiza*, *A. ilicifolius* and that of P concentration in *K. candel*, *B. gymnorrhiza*, *A. corniculatum* were the lowest in leaves. In *K. candel*, *B. gymnorrhiza*, and *A. ilicifolius*, the variation coefficient of C : N ratio was significantly higher in roots and stems than that in leaves. Among the four mangrove species, foliar and root P concentrations in *A. ilicifolius* were significantly higher than those in the other species, and stem P in *A. ilicifolius* was slightly higher than in the other species. The variation coefficients of C, N, P

concentrations in roots and C and P concentrations in leaves were higher in *A. ilicifolius* than in other species. C : N : P ratio in leaves (151 : 9 : 1) of four mangrove species was significantly lower than that in roots (187 : 4 : 1) or stems (239 : 5 : 1), suggesting that ecological stoichiometry of leaves was relatively stable. Our results provide theoretical basis for the large-scale research of ecological stoichiometry of mangrove and a scientific guidance for the conservation and sustainable management of mangrove plants.

Key words: mangrove; *Kandelia candel*; *Bruguiera gymnorrhiza*; *Aegiceras corniculatum*; *Acanthus ilicifolius*; C : N : P ecological stoichiometry.

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是研究生态系统中多重化学元素(主要是碳、氮、磷等)平衡的科学(曾昭霞等,2015),也是研究生态系统植物营养元素分配情况、利用效率和限制性元素判断的一种手段(周鹏等,2010),能够反映植物器官的内稳性及相互关系(Song *et al.*, 2014),有助于解决植物和生态系统养分供应与需求平衡等方面的问题(李从娟等,2013)。国内的生态化学计量学近年发展较快,但这些研究主要集中于森林和草原植被(Cao *et al.*, 2017; 罗艳等, 2018; 张萍等, 2018)。对于湿地生态系统的相关研究主要集中在群落生态系统植物叶片或土壤的养分含量特征方面(李兴福等, 2018),而对红树林湿地植物的生态化学计量特征研究非常匮乏(何琴飞等, 2017; 黎洁, 2017)。

红树林是生长在热带亚热带海岸潮间带、受到海水周期性浸没的木本植物群落,是兼具陆地和海洋特性的复杂生态系统,在改善海湾、净化污染和保护湿地多样性等方面发挥着不可替代的作用(Bayen *et al.*, 2005)。然而,多种人为活动和外来物种入侵等现象导致红树林面积萎缩、环境恶化、结构简单(吴筠, 2008)。福建沿海地区经常遭受台风袭击,红树林作为先锋树种在消波固堤、抵抗台风侵蚀等方面发挥着重要作用。漳江口红树林是中国北回归线北侧种类最多、生长最好的红树林天然群落。目前红树林研究主要集中于湿地生态系统形成与演化、湿地生态系统服务功能及价值评估、湿地遥感监测及保护分析等方面(赵峰等, 2011; 张和钰等, 2013; 陈传明, 2014),而对其营养元素的研究则报道较少。尽管何琴飞等(2017)对比分析了广西钦州湾不同红树林群落类型的土壤肥力及C、N、P、K生态化学计量比,黎洁(2017)也对北仑河口红树植物叶片和土壤的C、N、P化学计量特征的总体分布特征进行了研究,但对红树植物地下部分的研究相对较少,且对红树植物不同器官间养分元素的相互作用和分配差异尚不清楚。作为植物的重要营养器

官,根茎叶在很多性状上表现出关联性,如陈婵等(2016)对会同杉木(*Cunninghamia lanceolata*)器官间化学计量特征分析发现,不同器官间的营养元素是互相移动、互相影响的。认识不同器官间的关联性有助于我们理解植物对营养物质的利用与分配规律。

本研究通过调查秋茄、木榄、桐花树、老鼠簕4种红树植物不同器官的C、N、P含量及其生态化学计量特征,分析4种红树植物根、茎、叶的养分元素及变异性特征,揭示红树植物的限制性营养元素,探讨不同器官养分元素间的分配规律,以期为漳江口红树林的保护与恢复提供科学依据,为深入理解红树林生态系统的调控机理提供理论支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省云霄县漳江口国家级红树林自然保护区。地理位置为中国东南沿海,台湾海峡西岸南部东山湾,云霄县漳江口石矾塔以西,117°24'E—117°30'E, 23°53'N—23°56'N。保护区总面积2360 hm²,其中红树林沼泽湿地面积1300.6 hm²,河口水域、河口三角洲、潮间淤泥海滩面积1059.4 hm²,是以保护红树林、湿地鸟类、优良水产种质资源为主要对象的湿地类型保护区。

该保护区属亚热带海洋性季风气候,气候温暖湿润,光、热、水资源丰富;年平均气温21.2℃,1月均温14.1℃,7月均温28.5℃;极端最高气温出现在7月,为39.7℃;极端最低气温出现在12月,为0℃。近岸表层海水温度随季节变化较大,2月水温较低,8月水温较高,变化范围为14.9~25.6℃。年平均风速2.7 m·h⁻¹,秋冬季多偏北风,春夏季多偏南风。年平均降雨量为1714.5 mm,降雨量主要集中在4—9月。土壤为滨海滩涂淤泥和沙质淤泥,称为酸性硫酸盐土或红树林沼泽土壤,pH值为3.5~7.5,含有丰富的植物残体和有机质,厚达2 m以上。海域为不规则半日潮,平均潮差2.32 m,最高

表 1 漳江口红树林保护区 4 种红树植物概况
Table 1 Information of 4 mangrove species in Zhangjiang Estuary Reserve

树种	生活型	盖度 (%)	平均树高 (m)	土壤类型	分布区域
秋茄	小乔木	50	4.5	粉黏土	低潮线附近
木榄	小乔木	30	3.4	粉黏土	低潮线附近
桐花树	小乔木	45	3.5	粉黏土	低潮线附近
老鼠簕	灌木	20	1.2	粉黏土	高潮线附近

潮位 7.7 m, 最低潮位 3.03 m。

1.2 样品采集与处理

2017 年 9 月,在漳江口红树林国家自然保护区内选择一个具有代表性的群落作为样地,群落内有秋茄、木榄、桐花树、老鼠簕 4 个树种,在群落内随机设置 3 个面积为 4 m×5 m 的样方。在每个样方中选择 3 株生长良好、大小一致的植物个体作为标准样株,样方内 4 种红树植物的基本概况见表 1。采集每株植物不同方位中上部健康成熟叶片,采摘叶片混合作为叶样,每种红树类型采集 20 片;在选取的每株植物最低枝干上采集茎样;在离样株约 0.5 m 处挖掘 0~20 cm 土层的根系作为根样,清理土壤和杂质后分别装入布袋后带回实验室。用烘箱烘干至恒重,粉碎过筛,用于 C、N、P 含量测定。

1.3 测定方法

有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法,全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法,全磷含量测定采用钼锑钨比色法(中国林业科学研究院林业研究所,1999)。

1.4 数据分析

论文中的数据取多次重复结果的平均值,通过 SPSS 19.0 统计软件对 4 种红树植物不同器官的 C、N、P 及化学计量比进行单因素方差分析,设置为 $\alpha=0.05$;本研究中数据的前期处理、统计分析、图形绘制在 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 19.0 中完成。变异系数通过公式(1)计算得出。变异系数(coefficient of variation, CV) = 标准差/平均值×100% 计算得出。

2 结果与分析

2.1 4 种植物根茎叶的 C、N、P 含量

如图 1 所示,4 种植物根的 C、N、P 含量变化范围为 235.75~344.77、3.99~9.26、1.02~2.43 mg·g⁻¹,平均值分别为 279.78、5.41、1.50 mg·g⁻¹,木榄根的 C 含量显著大于其他 3 种植物($P<0.05$),老鼠

簕根的 P 含量显著大于其他 3 种植物($P<0.05$);茎的 C、N、P 含量变化范围为 342.74~396.47、5.34~9.51、1.28~1.65 mg·g⁻¹,平均值分别为 360.24、7.49、1.51 mg·g⁻¹,桐花树茎的 C 含量显著高于其他 3 种植物($P<0.05$),老鼠簕茎的 P 含量略高于其他三种植物,但差异性不显著($P>0.05$);叶片 C、N、P 含量变化范围为 326.85~390.64、16.85~25.59、1.56~4.21 mg·g⁻¹,平均值分别为 345.41、21.39、2.28 mg·g⁻¹,其中,老鼠簕叶的 P 含量显著大于其他 3 种植物($P<0.05$)。整体来说,4 种植物中木榄根、茎的 N、P 含量较低,而老鼠簕根、茎、叶的 P 含量偏高。秋茄、桐花树、老鼠簕各器官中的 C 含量均表现为茎、叶显著大于根($P<0.05$);秋茄、木榄、桐花树的 N、P 含量均表现为叶>茎>根,且叶的 N 含量与根、茎差异显著($P<0.05$)。

2.2 4 种植物根茎叶的化学计量比

如图 1 所示,4 种植物根的 C:N、C:P、N:P 变化范围为 31.67~91.39、98.95~346.59、3.16~4.11,平均值为 64.16、216.45、3.56;4 种植物根的 C:P 差异极显著($P<0.01$),C:N、N:P 差异不显著($P>0.05$)。其中,木榄根的 C:P 显著高于其他 3 种植物($P<0.05$);4 种植物茎的 C:N、C:P、N:P 变化范围为 42.00~73.02、211.44~282.55、4.05~5.64,平均值为 53.87、247.55、4.86,各树种间差异均不显著($P>0.05$);4 种植物叶的 C:N、C:P、N:P 变化范围为 12.83~19.66、102.08~216.59、6.37~14.39,平均值为 16.59、178.44、10.99。其中,老鼠簕的 C:P、N:P 显著低于其他 3 种植物($P<0.05$)。

秋茄、木榄、桐花树各器官的 C:N 均表现为根>茎>叶,叶的 C:N 与根、茎存在显著差异($P<0.05$);秋茄、桐花树、老鼠簕的 C:P 均表现为茎略大于根、叶,老鼠簕的茎与根、叶 C:P 差异显著($P<0.05$),秋茄、桐花树的茎与根、叶 C:P 差异不显著($P>0.05$);4 种植物 N:P 均表现为叶>茎>根,且叶与根、茎整体上存在显著差异($P<0.05$)。4 种植物茎的 C:N:P 值最高,为 239:5:1;根的 C:N:P 为 187:4:1,两者均高于叶片(151:9:1)的化学计量比。

2.3 4 种植物各器官生态化学计量比的变异

4 种植物不同器官 C、N、P 含量及其计量比的变异特征不同(表 2)。不同器官的 C 含量变异系数较小,均低于 17%,其中桐花树、老鼠簕均表现为根>叶>茎;整体来看,各器官 N 含量的变异系数高于 C

营养状况是土壤性质、水分供应等诸多环境因子共同作用的结果(吴锡麟等,2011)。4种红树植物叶C含量均值为 $345.41\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,低于亚热带地区陆生树种樟树(*Cinnamomum camphora*)和闽楠(*Phoebe bournei*)的叶片C含量(477.93 和 $484.48\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)(林喜珀等,2016),也低于滨海沙地防护林桉树(*Eucalyptus robusta*)和木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)的叶片C含量(503.19 和 $515.80\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)(邱岭军等,2017)。红树植物生长在海岸潮间带,涨潮时被海水浸润,淹水环境会造成植物叶水势下降,叶绿素结构被破坏,参与光合作用的酶活性下降,使光合产物的运输能力降低。此外,海岸潮间带的高盐、海水浸淹环境会引起植物气孔关闭,限制气体扩散,导致根部缺氧,从而抑制了植物的光合作用(Islam *et al.*, 2007; Ahmad *et al.*, 2008; 卢妍, 2010; Baisakh *et al.*, 2012)。光合速率降低,干物质积累减少,从而导致红树植物叶片C含量较低。有研究表明,叶C含量高的植物往往具有较强的抵御外界干扰的能力(Wright *et al.*, 2004),漳江口红树林保护区红树植物的叶片C含量相对较低,说明这4种红树植物碳固持和抵御外界环境的能力相对较弱。与陆生植物相比,4种植物叶P含量均值高于Han等(2005)和任书杰等(2007)研究的中国陆地植物叶片P含量均值(1.21 、 $1.28\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),这可能与红树植物的特殊生境和其独有的生长特性有关。红树林处于河口土壤沉积区,土壤中P含量相对较高,为植物提供了充足的P源(何琴飞等,2017)。也有研究表明,随着土壤含水率的增加,在一定范围度内植物对土壤中养分的吸收表现为上升趋势(余烁等,2011),故红树林的土壤环境可能会促进植物对养分的吸收。此外,红树植物可以通过自身的根系有效地网罗有机碎屑、固定和沉积污染物,增加了其获取养分的途径,加之发达的根系也便于植物从土壤中吸收养分,导致红树植物叶片P含量较高(何琴飞等,2017)。4种植物根的P含量均值($1.50\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)高于全球植被的平均水平($1.10\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)(Jackson *et al.*, 1997),证实了上述观点。4种植物的N、P含量均值分别为 21.39 、 $2.28\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,高于中国湿地植物叶片的N、P含量均值(16.07 、 $1.85\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)(胡伟芳等,2014)。研究区植物叶片N、P含量相对较高可能与红树植物和真菌的互做密切相关。有报道指出,该研究区红树植物高比例受丛枝菌根真菌的侵染(吴勇,2013)。菌根扩大了红树植

物对养分的吸收范围,并且将基质中不溶状态的营养变为可溶状态,从而提高了植物对养分的吸收和利用效率(Lin *et al.*, 2017)。此外,温度对叶片养分含量也有一定影响。本研究采样时间为9月,温度的升高会提高养分在土壤中的移动速度及根系对养分的利用效率,进而影响了植物叶片的养分含量(Wang *et al.*, 2018)。

植物叶片C:N、C:P表征植物吸收营养时同化C的能力,可以反映植物对养分的利用效率以及植物生长速率的快慢,具有重要的生态学意义(王维奇等,2011)。4种植物叶的C:N、C:P均值(16.59 和 178.44)均低于全球植物叶片的C:N、C:P平均水平(22.50 和 232.00)(Elser *et al.*, 2000)。叶片的N:P反映N和P供给状况的有效性,可以判断环境对于植物生长的养分供应状况和植物的生长速率(曾冬萍等,2013)。4种植物叶的N:P均值为 10.99 ,高于中国湿地植物(胡伟芳等,2014)和广西北仑河口4种红树植物(黎洁,2017)的N:P均值(8.67 和 10.47)。不同湿地生境的植物受限制状况不同,一般认为N:P<10或14反映植物受N限制(曾冬萍等,2013),N:P>16或20反映植物受P限制(Verhoeven *et al.*, 2006)。研究区植物的N:P<14,表明植物受N限制较为严重,这与黎洁(2017)对广西北仑河口红树植物限制性元素的研究结果一致。该研究区表现为N限制,这可能是因为红树林较陆生植物具有较高的P含量(胡伟芳等,2014),导致其N:P较低,进而表现为N限制;此外,高的N沉降速率及较高的N输入会导致生态系统的固N能力下降,损失N量超过其输入量,进而影响到研究区的营养状态(吕超群等,2007)。

3.2 4种红树植物C、N、P含量及化学计量特征的器官间差异

不同器官在植物生长过程中发挥着不同的作用,同一植物不同器官间的C、N、P含量存在明显差异(史军辉等,2017)。本研究发现,4种红树植物不同器官C含量整体表现为茎、叶>根。叶片是植物进行光合作用的主要器官,同化物质在叶片中积累较多,并通过输导组织传输到茎,从而使得植物叶片和茎中C含量较高(潘岩等,2012;罗艳等,2016)。4种红树植物的N、P含量整体表现为叶>茎>根。叶片既是植物的同化器官,也是植物重要的养分储存器官,且植物为满足自身生长需要,将体内大量养

分传递给叶片,叶片通过根、茎转移供给的流动性元素 N、P 含量较充足,使得叶片中 N、P 的贮量较大(赵亚芳等,2014)。红树植物的根系具有适应环境的特化形态,如坚实密集而发达的支柱根、各种形式的呼吸根,根系所吸收的营养元素既要供给自身的复杂根系(关超,2016),也要输出大量养分以维持地上部分的生长(徐云姬等,2016),故根系中的 N、P 含量相对较少。王维奇等(2011)对闽江河口芦苇湿地根茎叶的化学计量特征研究表明,芦苇湿地 C 含量表现为在根中最小,N、P 含量表现为叶>茎>根,这与本研究的结果基本一致,表明湿地植物在生长过程中不同器官具有相似的分配特征。

4种植物中,老鼠筋根、叶的 P 含量显著高于其他3种植物,茎的 P 含量虽与其他3种植物差异性不显著,但也略大于其他3种植物。本研究中,秋茄、木榄(显性胎生)和桐花树(隐形胎生)均为胎生红树,而老鼠筋为非胎生红树(张留恩等,2011)。胎生红树植物的胚乳细胞特化出转运组织,养分通过转运细胞得以从种皮向胚转运(周晓旋等,2016)。胎生苗在母体生长过程中,这种转运组织也存在于连接幼苗和母体的基部组织最外层。为了实现胚乳的大量生长和下胚轴的伸长,以便适时突破种皮而后脱离母体,胎生苗需要大量的养分供给(Aluri *et al.*,2017)。P 作为在植物体内移动性较强的元素,在胎生苗发育过程中通过转运组织大量输送给胚胎,这可能是胎生红树根、茎、叶器官中 P 含量较非胎生植物低的一个原因。

3.3 4种植物各器官生态化学计量比的变异

4种植物各器官的 C 含量变异系数均较小,均低于 17%,其中桐花树、老鼠筋均表现为根>叶>茎。各器官 C 含量变异小可能是由于植物主要是通过光合作用来吸收 C,使植物体内的 C 含量在一定水平内保持稳定;各器官 N、P 含量的变异系数相对较高,且秋茄、木榄、老鼠筋均表现为根、茎的变异系数大于叶,其中根的变异系数最高可达 58.73%。根是植物进行养分吸收和转运的重要器官,在植物生长缓慢期,根系从土壤中吸收的养分在根中储存,此阶段植物根系的养分含量较高;而在生长旺盛期,根系需要大量输出养分供给植物生长所需,并且需要维持红树植物自身较发达根系的生长,此阶段植物根部的养分含量较低,故植物根系的变异系数较大可能受植物生长阶段的影响(赵亚芳等,2014)。此外,根系的养分含量主要从土壤中吸收,研究区土壤

受不规则半日潮影响导致干湿显著变化,土壤中可溶性养分会随着水体发生迁移和流失,因此红树植物根系受外界环境的影响较大,对环境变化十分敏感(郑艳明等,2013;陈婵等,2016)。不同树种各器官 C : N 变异系数差异较大,总体表现为根、茎>叶,其中老鼠筋根的 C : N 变异系数高达 56.95%。不同器官 N : P 的根的变异系数均大于 20%,其中桐花树的根的变异系数达 50.73%。总体来看,本研究中 4 种红树植物根茎叶的 C、N、P 及 C : N 变异系数表现为根、茎>叶,且 C 的变异系数小,N、P 及 C : N 的变异系数较大。4 种红树植物中,老鼠筋根 C、N、P 与叶 C、P 的变异系数均大于其他 3 种植物。有研究表明,非胎生植物体内的脱落酸含量高于胎生植物,脱落酸会促进种子脱水休眠,休眠期植物的组织代谢相对减少(周晓旋等,2016),会引起营养元素吸收和转运的变化。此外,与非胎生植物相比,胎生植物在脱离母体时已经是相对完整的幼苗,具备高度适应海岸潮间带环境的形态生理特征,对外界环境的适应性相对较强(Kadoya *et al.*,2014),故胎生植物秋茄、木榄、桐花树的变异相对较小。

4 结论

研究区红树植物的叶片 C 含量较低,N、P 含量相对偏高。植物化学计量特征 N : P < 14,表明植物较大程度受 N 限制;4 种红树植物不同器官 C 含量整体表现为茎、叶>根,N、P 整体表现为叶>茎>根。4 种植物中,老鼠筋根、叶的 P 含量显著高于其他 3 种植物,茎的 P 含量略高于其他 3 种植物;4 种红树植物根茎叶的 C、N、P 及 C : N 变异系数表现为根、茎>叶,且 C 的变异系数小,N、P 及 C : N 的变异系数较大。老鼠筋根 C、N、P 与叶 C、P 的变异系数均大于其他 3 种植物。

本研究考察了 4 种红树植物不同器官的 C、N、P 含量及其化学计量关系,考虑到影响红树植物生长发育的因素有很多,若要探明红树植物对环境变化的适应机制,在后续研究中将进一步分析红树植物根、茎、叶和土壤的养分含量及化学计量比的季节性动态变化,以便较全面地揭示红树植物养分元素的调控机制,对提高红树林的经营和管理措施提供指导意义。

参考文献

陈婵,王光军,赵月,等. 2016. 会同杉木器官间 C、N、P

- 化学计量比的季节动态与异速生长关系. 生态学报, **36** (23): 7614-7623.
- 陈传明. 2014. 福建漳江口红树林国家级自然保护区公共管理研究. 湿地科学, **12**(6): 753-758.
- 关超. 2016. 红树林植物根系解剖结构研究(硕士学位论文). 沈阳: 沈阳农业大学.
- 胡伟芳, 章文龙, 张林海, 等. 2014. 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, **38**(10): 1041-1052.
- 何琴飞, 申文辉, 彭玉华, 等. 2017. 钦州湾红树林土壤肥力及其C、N、P、K化学计量特征. 西北林学院学报, **32**(6): 119-124.
- 黎洁. 2017. 广西北仑河口红树林植物种群动态与生态化学计量特征研究(硕士学位论文). 桂林: 广西师范大学.
- 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 2013. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤CNP的化学计量特征. 生态学报, **33**(18): 5760-5767.
- 李兴福, 苏德荣, 吕世海, 等. 2018. 呼伦贝尔草原辉河湿地不同淹水状态的土壤碳氮磷特征比较. 生态学报, **38**(6): 2204-2212.
- 林喜珀, 温小莹, 黄芳芳, 等. 2016. 6种热带、亚热带阔叶树种苗木生态化学计量特征. 林业与环境科学, **32**(2): 10-16.
- 卢妍. 2010. 湿地植物对淹水条件的响应机制. 自然灾害学报, **19**(4): 147-151.
- 罗艳, 贡璐. 2016. 塔里木盆地南缘不同生境下芦苇生态化学计量特征. 生态学杂志, **35**(3): 684-691.
- 罗艳, 贡璐, 李杨梅. 2018. 塔里木河上游绿洲农田不同生育期玉米根茎叶生态化学计量特征. 水土保持研究, **25**(2): 112-119.
- 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 2007. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应. 植物生态学报, **31**(2): 205-218.
- 潘岩, 白红彤, 李慧, 等. 2012. 栽培地区、采收季节和株龄对迷迭香精油成分和抑菌活性的影响. 植物学报, **47**(6): 625-636.
- 邱岭军, 何宗明, 胡欢甜, 等. 2017. 滨海沙地不同树种碳氮磷化学计量特征. 应用与环境生物学报, **23**(3): 555-559.
- 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 2007. 中国东部南北样带654种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, **28**(12): 2665-2673.
- 史军辉, 马学喜, 刘茂秀, 等. 2017. 胡杨(*Populus euphratica*)枝叶根化学计量特征. 中国沙漠, **37**(1): 109-115.
- 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 2011. 河口湿地植物活体-凋落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, **31**(23): 7119-7124.
- 吴筠. 2008. 福建漳江口红树林数量特征及其退化机制研究(硕士学位论文). 福州: 福建农林大学.
- 吴锡麟, 叶功富, 张尚炬, 等. 2011. 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝金属元素含量及其再吸收率动态. 应用与环境生物学报, **17**(5): 645-650.
- 吴勇. 2013. 中国不同区域红树林AMF侵染及土壤孢子密度特征研究(硕士学位论文). 广州: 中山大学.
- 徐云姬, 钱希昉, 李银银, 等. 2016. 根系分区交替灌溉对玉米籽粒灌浆及相关生理特性的影响. 作物学报, **42**(2): 230-242.
- 余添, 高明, 王子芳, 等. 2011. 土壤水分对烤烟生长、物质分配和养分吸收的影响. 植物营养与肥料学报, **17**(4): 989-995.
- 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 2013. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. 生态学报, **33**(18): 5484-5492.
- 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 2015. 桂西北喀斯特森林植物凋落物-土壤生态化学计量特征. 植物生态学报, **39**(7): 682-693.
- 张和钰, 陈传明, 郑行洋, 等. 2013. 漳江口红树林国家级自然保护区湿地生态系统服务价值评估. 湿地科学, **11**(1): 108-113.
- 张留恩, 廖宝文, 管伟. 2011. 模拟潮汐淹没对红树植物老鼠簕种子萌发及幼苗生长的影响. 生态学杂志, **30**(10): 2165-2172.
- 张萍, 章广琦, 赵一婷, 等. 2018. 黄土丘陵区不同森林类型叶片凋落物-土壤生态化学计量特征. 生态学报, **38**(14): 5087-5098.
- 赵峰, 张怀清, 刘华, 等. 2011. 福建漳江口红树林湿地保护区遥感监测及保护分析. 西北林学院学报, **26**(1): 160-165.
- 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 2014. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化. 植物学报, **49**(5): 560-568.
- 郑艳明, 尧波, 吴琴, 等. 2013. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片C、N、P动态特征. 生态学报, **33**(20): 6488-6496.
- 中国林业科学研究院林业研究所. 1999. LY/T 1271-1999 森林植物与森林枯枝落叶层全氮、磷、钾、钠、钙、镁的测定. 北京: 中国标准出版社.
- 周鹏, 耿燕, 马文红, 等. 2010. 温带草地主要优势植物不同器官间功能性状的关联. 植物生态学报, **34**(1): 7-16.
- 周晓旋, 蔡玲玲, 傅梅萍, 等. 2016. 红树植物胎生现象研究进展. 植物生态学报, **40**(12): 1328-1343.
- Ahmad MSA, Hussain M, Ijaz S, et al. 2008. Photosynthetic performance of two mung bean (*Vigna radiata*) cultivars under lead and copper stress. *International Journal of Agriculture and Biology*, **10**: 167-172.
- Aluri JSR, Bethapudi R, Chappidi PR. 2017. Reproductive ecology of *Acanthus ilicifolius* L., a non-viviparous mangrove associate in *Coringa* mangrove forest, *Andhra Pradesh* (India). *Transylvanian Review of Systematical & Ecological Research*, **19**: 17-28.
- Baisakh N, RamanaRao MV, Rajasekaran K, et al. 2012. Enhanced salt stress tolerance of rice plants expressing a vacuolar H⁺-ATPase subunit c1 (SaVHAc1) gene from the halophyte grass *Spartina alterniflora* Loisel. *Plant Biotechnology Journal*, **10**: 453-464.
- Bayen S, Wurl O, Karupiah S, et al. 2005. Persistent organic pollutants in mangrove food webs in Singapore. *Chemosphere*, **61**: 303-313.

- Cao Y, Chen YM. 2017. Coupling of plant and soil C : N : P stoichiometry in black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau, China. *Trees*, **31**: 1559–1570.
- Elser JJ, Fagan W F, Denno RF, *et al.* 2000. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, **408**: 578–580.
- Han W, Fang J, Guo D, *et al.* 2005. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, **168**: 377–385.
- Islam E, Liu D, Li TQ, *et al.* 2007. Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials*, **154**: 914–926.
- Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **94**: 7362–7366.
- Kadoya T, Inoue T. 2014. Spatio-temporal pattern of specific gravity of mangrove diaspore; Implications for upstream dispersal. *Ecography*, **38**: 472–479.
- Lin J, Wang Y, Sun S, *et al.* 2017. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, photosynthesis and photosynthetic pigments of *Leymus chinensis* seedlings under salt-alkali stress and nitrogen deposition. *Science of the Total Environment*, **576**: 234–241.
- Song ZL, Liu HY, Zhao FJ, *et al.* 2014. Ecological stoichiometry of N : P : Si in China's grasslands. *Plant and Soil*, **380**: 165–179.
- Verhoeven JTA, Arheimer B, Yin C, *et al.* 2006. Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology and Evolution*, **21**: 96–103.
- Wang R, Wang X, Jiang Y, *et al.* 2018. Soil properties determine the elevational patterns of base cations and micronutrients in plant-soil system up to the upper limits of trees and shrubs. *Biogeosciences*, **15**: 1763–1774.
- Wright IJ, Reich PB, Westoby M, *et al.* 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, **428**: 821–827.
-
- 作者简介 樊月,女,1994年生,硕士,主要从事森林可持续经营方面的研究。E-mail: 2722633960@qq.com
责任编辑 张敏
-