

刘滨尔, 廖宝文, 李 玫, 等. 不同潮汐淹浸程度下 2 种红树植物化学计量特征[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(1): 86-92.

# 不同潮汐淹浸程度下 2 种红树植物化学计量特征

刘滨尔, 廖宝文, 李 玫, 陈玉军, 管 伟

(中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东 广州 510520)

**摘要:**【目的】通过化学计量学和水文学的分析, 摸清主要红树植物尖瓣海莲 *Bruguiera sexangula* var. *rhynochopetala* 和白骨壤 *Avicennia marina* 的适生环境, 为中国红树林保护和恢复提供科学依据. 【方法】借助室内潮汐模拟系统, 分析尖瓣海莲和白骨壤幼苗的叶、茎、根在每天不同淹浸时间梯度下 8 种大量元素和 5 种微量元素的化学计量特征变化. 【结果和结论】K、P、Na、Cl、Mg、Ca、Al、Fe、Mn、B 元素含量在每天不同程度的潮水淹浸下存在明显差异. 淹浸时间的长短能够显著影响幼苗各器官的化学计量特征, 且 2 个物种化学计量特征区别较大. 潮水淹浸对尖瓣海莲和白骨壤各器官矿质元素的影响以叶片的变化最明显, 茎干和根部变化较小. 随每天淹浸时间延长, Fe、Al、Mn、Ni、B 等元素在叶片中不断累积增加, 在根中略有减少, 尖瓣海莲叶中 Fe、Al 在淹浸 20 h 时的含量是淹浸 2 h 的 4.2 和 6.6 倍. 白骨壤叶片中 Fe、Al、Mn、Ni 和 B 在每天淹浸 24 h 时的含量是每天淹浸 2 h 的 4.7、1.1、3.5、4.0 和 1.5 倍. 这可能是红树植物受水淹胁迫后在元素化学计量上的重要表现之一. 2 种植物各个器官内 Mg、Ca 2 种元素含量变化与淹浸程度均显著相关.

**关键词:** 白骨壤; 尖瓣海莲; 潮汐; 淹浸时间; 化学计量学

中图分类号: Q948.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2014)01-0086-07

## Stoichiometric characteristics of mangroves *Avicennia marina* and *Bruguiera sexangula* var. *rhynochopetala* seedlings altered by different tide statuses

LIU Biner, LIAO Baowen, LI Mei, CHEN Yujun, GUAN Wei

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:**【Objective】Through analysis of stoichiometry and hydrology, the right growing environment of the main species of *Bruguiera sexangula* var. *rhynochopetala* and *Avicennia marina* seedlings and their conservation and restoration in China could be figured out. 【Method】The influences of waterlogging time on stoichiometric characteristics of *Bruguiera sexangula* var. *rhynochopetala* and *Avicennia marina* seedlings in different organs (leaf, stem and root, respectively) were studied using the automatic tidal-simulation device in sand culture of greenhouse. The contents of 8 macroelements and 5 microelements were determined in the waterlogging treatments, respectively. 【Result and conclusion】The content of K, P, Na, Cl, Mg, Ca, Al, Fe, Mn, B differed significantly in seedlings when waterlogging stress varied. The result of the experiment showed waterlogging had a significant effect on the distribution characteristics of elements in different organs of seedlings, and different species differed in stoichiometric characteristics. The elemental content in leaf was more obvious in waterlogging than that in stem and root of *B. sexangula* var. *rhynochopetala* and *A. marina* seedlings. The result of waterlogging treatment showed the contents of Fe, Al, Mn, Ni, B increased in leaf continually, decreasing in root slightly. The Fe and Al content in 20 h waterlogging about 4.2 and 6.6 times higher than that of 2 h in *B. sexangula* var. *rhynochopetala*

收稿日期: 2013-02-21 优先出版时间: 2013-11-07

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20131107.1612.021.html>

作者简介: 刘滨尔 (1988—), 男, 硕士, E-mail: 335217789@qq.com; 通信作者: 廖宝文 (1963—), 男, 研究员, 博士, E-mail: baowenliao@rift.ac.cn

基金项目: 国家林业科技支撑计划专题 (2009BADB2B0404); 国家自然科学基金 (41176084); 广东省林业科技创新专项资金 (2011KJ CX017-01, 2009KJ CX013-01); 国家林业局海南东寨港红树林生态站项目

<http://xuebao.scau.edu.cn>

seedlings. The Fe, Al, Mn, Ni, B in 24 h waterlogging about 4.7, 1.1, 3.5, 4.0 and 1.5 times than that of 2 h in *A. marina* seedlings. This is possibly one of the most important features of mangrove species in stoichiometry. There is a significant correlation between the change in Mg and Ca in different organs of two species and waterlogging levels.

**Key words:** *Avicennia marina*; *Bruguiera sexangula* var. *rhynochopetala*; tide; waterlogging time; stoichiometry

红树林生长于热带、亚热带潮间带,且主要分布于存在淡水和营养物质汇入且受到庇护的河口、泻湖、海岸<sup>[1]</sup>. 白骨壤 *Avicennia marina* 和尖瓣海莲 *Bruguiera sexangula* var. *rhynochopetala* 是常见的红树林造林树种<sup>[2]</sup>. 尖瓣海莲是红树科木榄属常绿乔木,最高可达 15 m,天然分布于海南岛东海岸东寨港、清澜港等地. 白骨壤为马鞭草科植物,属广布性红树植物,是我国红树植物中分布较广、抗性较强的造林先锋树种之一,具有很强的耐盐和耐淹水能力,在我国分布于广东、广西、海南、福建和台湾的海岸河口区<sup>[3-4]</sup>.

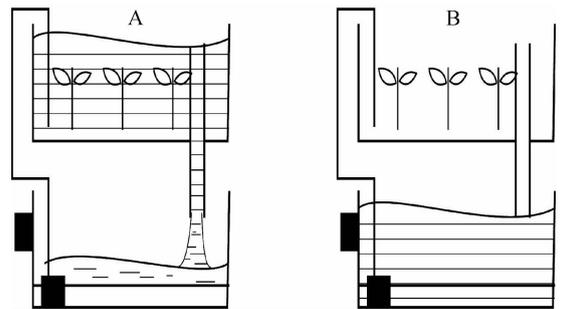
生态化学计量学 (Ecological stoichiometry) 结合了生态学和化学计量学的基本原理,是研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学<sup>[5]</sup>. 生态化学计量学理论认为有机体内各元素的比值决定了有机体对环境的响应策略<sup>[6]</sup>. 淹浸的变化会影响红树植物各个器官结构的变化<sup>[1]</sup>,并且显著干扰红树植物对营养元素的吸收<sup>[7]</sup>. 红树植物的化学计量学研究多集中在 C、N、P 3 种元素,且普遍与有机碳<sup>[8]</sup>、土壤营养物<sup>[9]</sup>、DNA 和 RNA<sup>[10]</sup> 联系起来探究. 红树林生态系统内的化学计量学多集中在水质<sup>[11]</sup>、土壤<sup>[12]</sup>、污染<sup>[13]</sup> 方面. 目前,红树植物胁迫状态下的生态化学计量学研究在国内外鲜见报道. 本文探讨了不同淹浸梯度下尖瓣海莲和白骨壤幼苗不同器官内大量元素和微量元素的含量变化. 旨在探索元素在不同淹浸梯度下产生差异的规律和机理,以期深入了解 2 种红树幼苗的化学生态学特征,为红树林人工恢复、自然恢复、林下人工促进更新的研究提供基础资料.

## 1 材料与方法

### 1.1 潮汐模拟系统和植物材料

淹浸模拟试验采用潮汐模拟系统(图 1)实现. 潮汐模拟系统安装在玻璃温室内,位于广州市热带林业研究所温室实验区内. 试验期间温室内最高气温 39 °C,最低气温 21 °C,平均气温 27 °C. 玻璃屋顶减少了日光的 8%~10%. 潮汐模拟系统由自动潮汐模拟槽组成,共有 12 对模拟槽,分为上槽和下槽,上

槽为培养槽,下槽为贮水槽,规格为长×宽×高=1.2 m×0.7 m×0.4 m. 使用水泵连接上下槽,水泵速率为 12 L/min. 定时器控制涨潮和退潮的时间.



A: 潮汐淹浸; B: 未淹浸

图 1 潮汐模拟系统

Fig. 1 The tide simulation system

淹浸模拟试验使用人工配置海水,盐度为 10‰,每周对水体盐度和水位深度进行校正. 模拟半日潮,每天幼苗被淹浸的时间为 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24 h,共 12 个处理. 每个物种的处理为 18 株,即 3 个重复,每重复 6 株. 尖瓣海莲胚轴于 2007 年 3 月 28 日采自海南东寨港,白骨壤 1 年生幼苗于 2008 年 6 月 9 日采自湛江红树林保护区. 尖瓣海莲培养时间为 2007 年 4—10 月,白骨壤培养时间为 2008 年 6 月—次年 1 月.

### 1.2 化学计量学的测定方法

在试验结束前 1 周对所有的试验苗木取样,摘取健康完整的叶、茎、根,在 105 °C 中杀青 20 min,然后在 80 °C 下烘至恒质量,磨成粉密封备用.

元素测定参考中华人民共和国林业行业标准 LY/T1269—1274—1999. 其中:全氮的测定参考 LY/T 1269—1999,采用凯氏法;全氯的测定参考 LY/T 1272—1999,采用氧化钙干灰化—硝酸银滴定法;全硼的测定参考 LY/T 1273—1999,采用干灰化—甲亚胺比色法;全镍采用干灰化—ICP 测定;全铁、铝、钠、锰和锌的测定参考 LY/T 1270—1999,采用硝酸—高氯酸消煮法,并进行 ICP 测定. 钙和镁采用原子吸收分光光度计法. 磷使用钼锑抗比色法. 钾使用火焰光度计法. 每个样品重复测量 3 次,测定结果以单位质量样本中的元素质量(g/kg 或 mg/kg)表示.

### 1.3 数据分析

采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Spearman 相关分析. 多重比较采用最小显著差异法 (LSD). 数据分析软件使用 SPSS 13.0, 图形处理使用 Origin Pro 8.0.

## 2 结果与分析

### 2.1 淹浸对尖瓣海莲幼苗矿质元素含量变化的影响

从图2和图3可以看出,尖瓣海莲幼苗叶片中元素 N、Mg、Al、P 和 Fe 含量随着淹浸时间的延长而上升, Mg、Al 和 Fe 含量在每天淹浸时间超过 12 h 后明显上升, Fe 含量在每天淹浸 16、18 和 20 h 分别比

淹浸 2 h 增加 1.8、3.0 和 4.2 倍. Mg 是构成叶绿素的重要元素,在光能的吸收、传递、转换过程中起重要作用, Al 对植物生长的有益作用往往属于次级反应,一般认为主要是由于 Al 减轻了其他矿物质,特别是 P 和 Cu 毒害,而 Fe 在植物体中的主要生理功能是作为某些酶的组成成分,如参与组成过氧化物酶、过氧化氢酶和细胞色素氧化酶等,与呼吸作用、光合作用等重要生命活动的关系密切,这 3 种元素对植物的正常生长都具有重要的作用,但如累积过量将导致金属元素毒害<sup>[14]</sup>. 每天淹浸时间超过 12 h 后,这 3 种元素 (Mg、Al 和 Fe) 的明显上升表明,尖瓣海莲幼苗受到一定程度的金属毒害影响,不利于其生长.

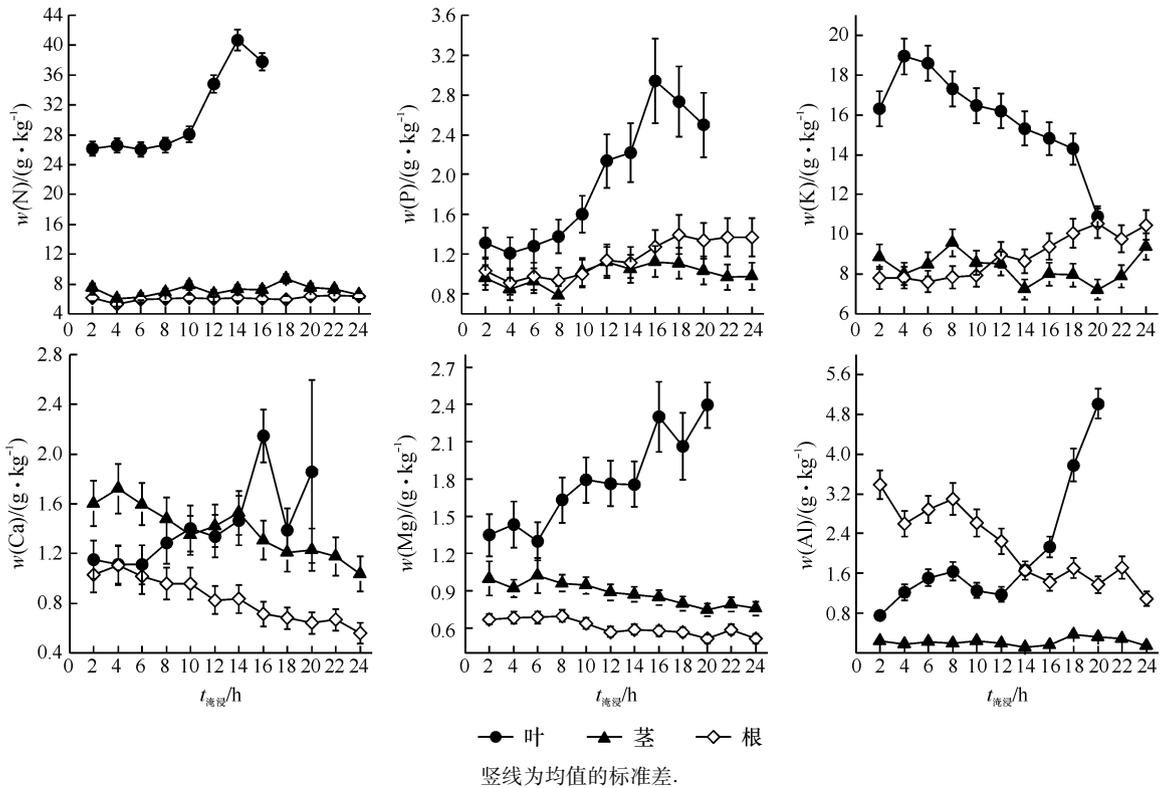


图2 淹浸时间对尖瓣海莲叶、茎和根中大量元素含量的影响

Fig.2 Effects of waterlogging time on the leaf, stem and root macroelements contents of *Bruguiera sexangula* var. *rhynochopetala*

叶片内元素 K 含量较有规律地随着每天淹浸时间的延长而减少 (图2), 每天淹浸 16、18 和 20 h 分别比淹浸 2 h 减少 9.1%、12.3% 和 33.2%. K 是植物体内有机结构的组成成分,参与酶促反应或能量代谢及生理调节,在长时间淹浸下,尖瓣海莲叶片中 K 含量的下降也表明其渗透调节功能的下降或混乱,对植物生长不利. Mn 与光合作用关系密切,缺 Mn 时,会引起叶绿体膜遭到破坏<sup>[15]</sup>,所以 Mn 能稳定叶绿体的结构, Mn 还参与光合作用中的光解过程,与氧的释放有关. 尖瓣海莲幼苗叶片内的 Mn 含量随每天淹浸时间的延长呈现先升后降的变化趋势,表明一定时间的淹浸有利于尖瓣海莲的叶绿素合成和光合作用,利于生长,但每天淹浸时间过长光合作用将受限,

生长受抑制.

随着每天淹浸时间的延长,尖瓣海莲茎干内除了 Mg 含量呈下降趋势外,其他矿质元素在茎干内的含量与淹浸时间的关系不大密切,变化规律不明显. 可见,尖瓣海莲幼苗茎干对淹浸逆境的反应不如叶片敏感.

尖瓣海莲幼苗根部中元素 Ca、Mg、Al、Mn 和 Fe 含量随着每天淹浸时间的延长而下降,几乎凡是叶片中含量上升的元素在根部都有逐渐减少的趋势,也就是说随着每天淹浸时间的增加,尖瓣海莲幼苗中这些元素逐渐往叶片转移. 例如:每天淹浸 16、18 和 20 h 根系中,元素 Fe 含量分别比淹浸 2 h 的减少 66.7%、50.8% 和 68.8%,元素 Al 含量分别比淹浸 2

h 的减少 59.5%、49.2% 和 67.7%。K 元素则相反,随着每天淹没时间的延长,叶片内 K 含量下降,而地下部分的 K 含量则上升,K 元素从叶片转移到了根

部,用以加强根部的渗透调节功能.其他元素含量随每天淹没时间的增加变化趋势不明显.

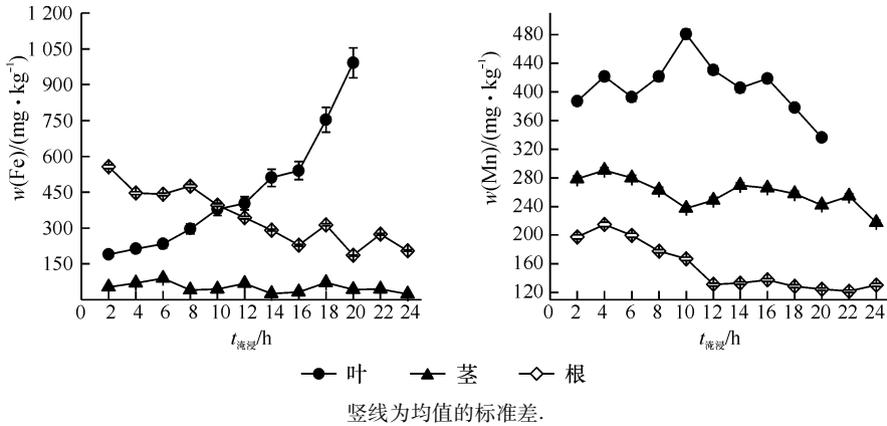


图 3 淹没时间对尖瓣海莲叶、茎和根中微量元素含量的影响

Fig. 3 Effects of waterlogging time on the leaf, stem and root microelements contents of *Bruguiera sexangula* var. *rhynchopetala*

### 2.2 淹没对白骨壤幼苗矿质元素变化的影响

不同淹没时间处理下,白骨壤幼苗叶片内 P、K、Ca、Cl、Mg、Na、Al、Fe、Mn、Zn、Ni 和 B 元素含量均有

显著差异 ( $P < 0.05$ ). 从图 4 和图 5 可以看出,白骨壤幼苗叶片中 P、Ca、Al、Fe、Mn、Ni 和 B 元素含量均随着每天淹没时间的延长而上升. 其中,Fe 元素含量

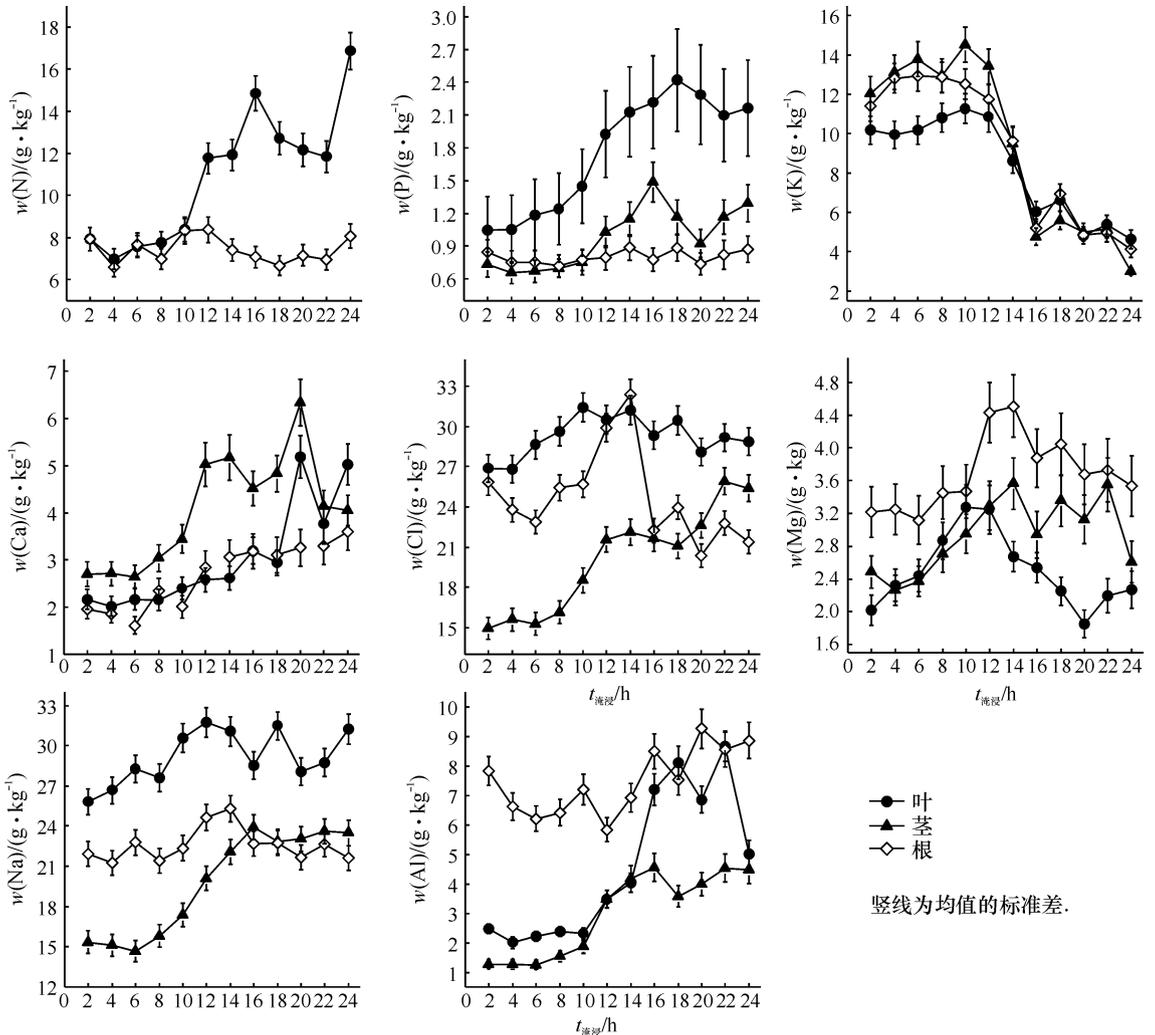


图 4 淹没时间对白骨壤叶、茎和根中大量元素含量的影响

Fig. 4 Effects of waterlogging time on the leaf, stem and root macroelements contents of *Avicennia marina*

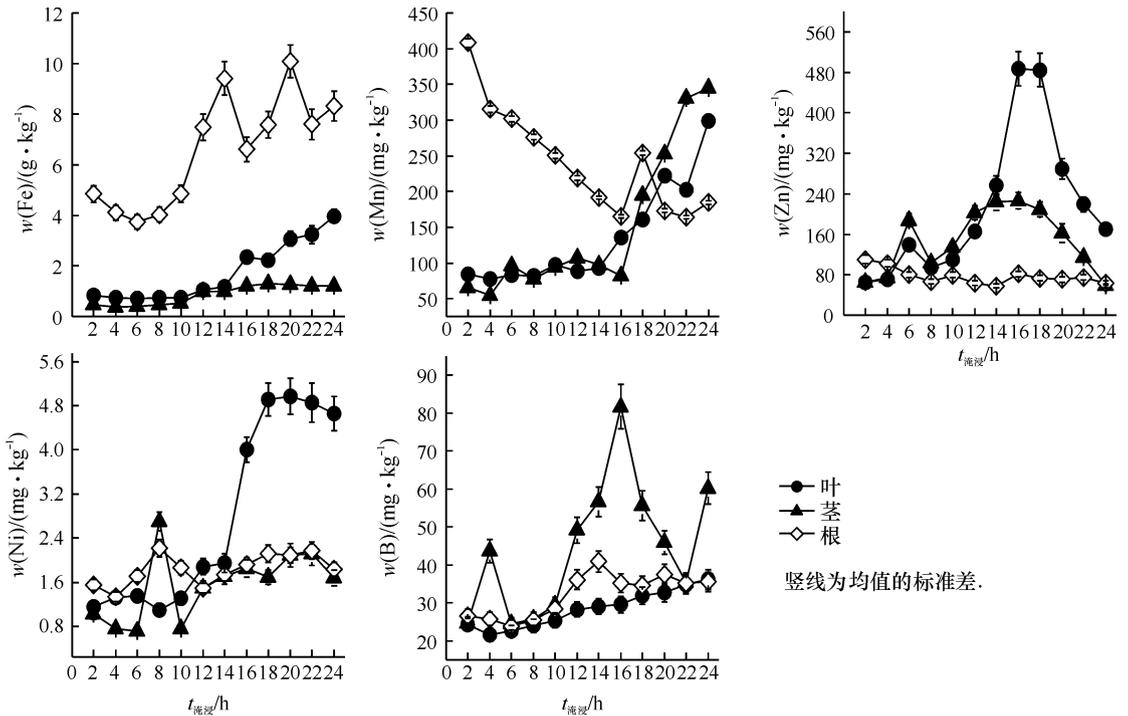


图5 淹浸时间对白骨壤叶、茎、根中微量元素含量的影响

Fig. 5 Effects of waterlogging time on the leaf, stem and root microelements contents of *Avicennia marina*

每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加2.6、2.8和1.3倍, Al元素含量每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加1.8、2.5和1.0倍, Ni元素含量每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加3.3、3.2和2.2倍, B元素在每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加34.5%、43.2%和48.7%, 但K元素较有规律地随着淹浸时间的延长而减少, 每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h减少52.5%、47.3%和54.5%, Zn含量随淹浸时间的延长先升后降, Cl、Mg和Na变化规律不明显。

Zn与生长素的形成有密切关系<sup>[14]</sup>, 缺Zn时生长素含量下降, 植株的生长受阻, 并且Zn与光合作用、呼吸作用都有关系。随着淹浸时间的延长, 白骨壤幼苗叶片内的Zn先升后降, 表明其生长适应性从适应短时间淹浸到不适于长时间淹浸的变化趋势。在短时间淹浸处理下白骨壤幼苗叶片内Fe、Al、Mn和B的部分积累可促进其光合作用, 对其生长有利, 但淹浸时间过长, 造成叶片中Fe、Al、Mn、Ni、B等元素大量累积而逐渐中毒, 可能是导致幼苗生长不良的主要原因之一。

不同淹浸时间处理下, 白骨壤幼苗茎干内N、P、K、Ca、Cl、Mg、Na、Al、Fe、Mn、Zn、Ni和B元素含量均有显著差异( $P < 0.05$ )。从图4、图5可以看出, 白骨壤幼苗茎干中Cl、Na、Al、Fe和Mn元素含量均随着淹浸时间的延长而上升, 其中, Fe元素每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加1.8、1.5和1.5倍。

元素Al在每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加2.1、2.6和2.5倍。在短时间淹浸处理下, 白骨壤幼苗茎干内Fe、Al、Mn的部分积累可促进其光合作用, 对其生长有利, 但淹浸时间过长, 造成叶片中Fe、Al、Mn等元素大量累积而逐渐中毒, 导致苗木死亡。元素K含量同样是较有规律地随着淹浸时间的延长而减少, 每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h的减少58.6%、57.1%和75.2%。随淹浸时间的改变, 其他矿质元素含量变化规律不明显。可见白骨壤幼苗茎干对淹浸胁迫的反应没有叶片敏感。

不同淹浸时间处理下, 除元素P外, 白骨壤幼苗根部N、K、Ca、Cl、Mg、Na、Al、Fe、Mn、Zn、Ni和B含量均有显著差异( $P < 0.05$ )。从图4、图5可以看出, 白骨壤幼苗根部中元素Ca、Fe、Ni和B的含量均随着淹浸时间的延长而上升。其中, 元素Ca含量在每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加66.5%、68.2%和83.7%, 元素Fe每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加108.5%、57.1%和72.0%, 元素Ni每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加34.6%、40.5%和18.3%, 元素B每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h增加40.9%、32.1%和33.5%。元素Ca、Fe、Ni和B的大量积累将对白骨壤幼苗产生毒害, 这可能是淹浸时间过长导致白骨壤幼苗生长不良或死亡的主要原因之一。元素K和Mn却较有规律地随着淹浸时间的延长而减少, K元素每天淹浸20、22和24 h分别比淹浸2 h的减

少 57.6%、56.6% 和 64.0% ;Mn 元素每天淹没 20、22 和 24 h 分别比淹没 2 h 的减少 57.5%、59.8% 和 54.8%。随淹没时间的延长其他矿质元素变化规律不明显,可见白骨壤幼苗根部对淹没胁迫的反应没有叶片敏感。

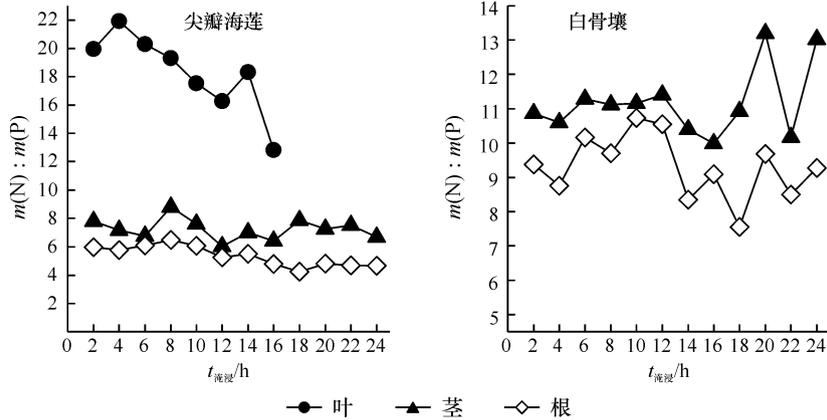


图6 淹没下尖瓣海莲和白骨壤叶、茎和根中  $m(N):m(P)$  的变化

Fig. 6 Effects of waterlogging on the  $m(N):m(P)$  of leaf, stem and root of *Bruguiera sexangula* var. *rhyncho petala* and *Avicennia marina*

### 2.4 淹没与元素含量的相关关系

相关性分析(表1)表明:淹没与尖瓣海莲叶片元素含量的显著正相关排序为  $Fe > P > N > Mg > Al > Ca$ ,淹没与尖瓣海莲茎元素含量的显著负相关排序为  $Ca < Mg < Mn$ ,淹没与尖瓣海莲根部元素含量的显著正相关排序为  $K > P$ ,显著负相关排序为  $Ca < Fe <$

### 2.3 淹没下尖瓣海莲和白骨壤各器官中 $m(N):m(P)$

图6表明:尖瓣海莲3种器官的  $m(N):m(P)$  随淹没时间延长而降低.白骨壤2种器官的  $m(N):m(P)$  随淹没时间延长而波动.尖瓣海莲表现出了N限制的特征。

$Mn < Al < Mg$ ;淹没与白骨壤叶片元素含量的显著正相关排序为  $B > Ca > Mn > Fe > P = Ni > Al > Zn > Na$ ,淹没与白骨壤茎元素含量的显著正相关排序为  $Cl > Na > Mn > Fe > Al = N > P > Ca > B > Mg$ ,淹没与白骨壤根部元素含量的显著正相关排序为  $Ca > Fe > B > Al > Mg$ ,显著负相关排序为  $Mn < K$ .

表1 尖瓣海莲和白骨壤的叶、茎和根中元素含量与淹没时间的相关关系<sup>1)</sup>

Tab.1 Correlations between leaf, stem, root elements contents of *Bruguiera sexangula* var. *rhyncho petala*, *Avicennia marina* and waterlogging time

植物名	器官	N	P	K	Ca	Cl	Mg	Na	Al	Fe	Mn	Zn	Ni	B
尖瓣海莲	叶	0.905 **	0.915 **	-0.879 **	0.830 **		0.903 **		0.842 **	1.000 **	-0.345			
	茎	0.207	0.497	-0.406	-0.937 **		-0.923 **		0.098	-0.510	-0.699 *			
	根	0.503	0.867 **	0.937 **	-0.979 **	-	-0.790 **	-	-0.860 **	-0.916 **	-0.909 **			
白骨壤	叶		0.860 **	-0.755 **	0.937 **	0.217	-0.280	0.587 *	0.832 **	0.916 **	0.923 **	0.776 **	0.860 **	0.958 **
	茎	0.860 **	0.832 **	-0.755 **	0.671 *	0.937 **	0.587 *	0.895 *	0.860 **	0.874 **	0.888 **	0.175	0.545	0.657 *
	根	-0.063	0.350	-0.860 **	0.958 **	-0.545	0.608 *	0.112	0.664 *	0.818 **	-0.867 **	-0.517	0.538	0.692 *

1)“\*\*”表示  $P < 0.01$ ;“\*”表示  $P < 0.05$ 。

## 3 讨论与结论

潮水淹没对尖瓣海莲和白骨壤各器官矿质元素的影响以叶片的变化最明显,茎干和根部亦有或多或少的变化,但多数在淹没梯度之间差异不显著.本研究测定的元素主要有大量元素 N、P、K、Ca、Cl、Mg、Na、Al,微量元素 Fe、Mn、Zn、Ni、B,这些元素中以大量元素 K、P、Na、Cl、Mg、Ca、Al 和微量元素 Fe、Mn、B

的变化较大。

尖瓣海莲幼苗叶片中元素 N、Mg、Al、P 和 Fe 含量随着每天淹没时间的延长而上升,且 Mg、Al 和 Fe 含量在每天淹没时间超过 12 h 后明显上升,元素 K 随每天淹没时间的延长而下降;茎干内 Mg 随每天淹没时间的延长呈下降趋势;根部中,元素 Ca、Mg、Al、Mn 和 Fe 含量随着每天淹没时间的延长而下降,这些元素逐渐往叶片转移.一定时间的淹没有利于尖

瓣海莲的叶绿素合成和光合作用<sup>[16]</sup>,利于生长,但淹浸时间过长时,其光合作用将受限,生长受抑制.白骨壤幼苗叶片中,P、Ca、Al、Fe、Mn、Ni(有害重金属)和B含量随着每天淹浸时间的延长而上升,而K却减少,Zn为先升后降;茎干中,Cl、Na、Al、Fe和Mn元素含量随淹浸时间延长而上升,而K却减少;根部中,Ca、Fe、Ni和B元素含量随每天淹浸时间延长而上升.在短时间淹浸处理下,白骨壤幼苗叶片中Fe、Al、Mn和B的积累可促进其光合作用<sup>[17]</sup>.每天淹浸时间过长造成叶片中Fe、Al、Mn、Ni和B元素大量累积,可能是导致小苗生长不良或死亡的主要原因.

本试验通过控制淹浸时间,模拟了尖瓣海莲和白骨壤早期生长的环境,测定了其各器官的化学元素含量.但是模拟试验低估了潮间带红树林生长区域不同因子交互作用的复杂性.P以 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 和 $\text{HPO}_4^{2-}$ 的形式在组织中吸收和释放,同时浓度受到土壤和水质pH的影响.难溶的Fe、Ca和磷酸盐会直接矿质化,进而在根周围直接释放溶解物和气体<sup>[18]</sup>,所以对Fe、Ca和P的定量非常困难.本试验只考虑了淹浸时间,而水温、空气温度、潮汐类型对红树植物元素化学计量的影响是下一步需要探讨的内容.

#### 参考文献:

- [1] LUGO A E, SNEDAKER S C. The ecology of mangroves [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1974, 5: 39-64.
- [2] 廖宝文, 李玫, 陈玉军, 等. 中国红树林恢复与重建技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 16-33.
- [3] 林鹏. 中国东南部海岸红树林的类群及其分布[J]. *生态学报*, 1981, 1(3): 283-290.
- [4] 林鹏. 红树林研究论文集[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1990: 98.
- [5] HESSEN D O. Stoichiometry in food webs; Lotka revisited [J]. *Oikos*, 1997, 79(1): 195-200.
- [6] HIBBARD K A, SCHIMEL D S, ARCHER S, et al. Grassland to woodland transitions: Integrating changes in landscape structure and biogeochemistry [J]. *Ecol Appl*, 2003, 13(4): 911-926.
- [7] BOTO K G, SAFFIGNA P, CLOUGH B F. The role of nitrate in nitrogen nutrition of the mangrove *Avicennia marina* [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1985, 21: 259-265.
- [8] ERIK K, STEVEN B, THORSTEN D. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review [J]. *Aquat Bot*, 2008, 89(2): 201-219.
- [9] KRISTENSEN E, ANDERSEN F Ø, HOLMBOE N, et al. Carbon and nitrogen mineralization in sediments of the Bangrong mangrove area, Phuket, Thailand [J]. *Aquat Microb Ecol*, 2000, 22: 199-213.
- [10] REEF R, BALL M C, FELLER I C, et al. Relationships among RNA: DNA ratio, growth and elemental stoichiometry in mangrove trees [J]. *Funct Ecol*, 2010, 24(5): 1064-1072.
- [11] DEY M, GANGULY D, CHOWDHURY C, et al. Intra-annual variation of modern foraminiferal assemblage in a tropical mangrove ecosystem in India [J]. *Wetlands*, 2012, 32(5): 813-826.
- [12] 林初夏, 储诚兴, 卢文洲, 等. 深圳福田自然保护区红树林土壤的化学特征 [J]. *生态科学*, 2004, 23(2): 118-123.
- [13] WICKRAMASINGHEA S, BORINB M, KOTAGAMAC S W, et al. Multi-functional pollution mitigation in a rehabilitated mangrove conservation area [J]. *Ecol Eng*, 2009, 35(5): 898-907.
- [14] 王晶英, 敖红, 张杰, 等. 植物生理生化技术与原理 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 135-136.
- [15] STITT M, MCC LILLEY R, HELDT H W. Adenine nucleotide levels in the cytosol, chloroplasts, and mitochondria of wheat leaf protoplasts [J]. *Plant Physiol*, 1982, 70(4): 971-977.
- [16] 廖宝文, 邱凤英, 张留恩, 等. 盐度对尖瓣海莲幼苗生长及其生理生态特性的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6363-6371.
- [17] 廖宝文, 邱凤英, 张留恩, 等. 红树植物白骨壤小苗对模拟潮汐淹浸时间的生长适应性 [J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1345-1351.
- [18] EI-TARABILY K A, YOUSSEF T. Enhancement of morphological, anatomical and physiological characteristics of seedlings of the mangrove *Avicennia marina* inoculated with a native phosphate-solubilizing isolate of *Oceanobacillus picturæ* under greenhouse conditions [J]. *Plant Soil*, 2010, 332(1/2): 147-162.

【责任编辑 李晓卉】