

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*

吴锡麟¹ 叶功富² 张尚炬⁴ 林益明⁴ 张立华^{3**}

(¹闽江学院地理科学系 福州 350108)

(²福建省林业科学研究院 福州 350012)

(³中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003)

(⁴厦门大学生命科学学院 厦门 361005)

摘要 对福建东山赤山林场不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝中的钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)、铁(Fe)、锰(Mn)和锌(Zn)元素含量及其再吸收率动态进行了研究。结果表明,海岸梯度对短枝木麻黄小枝中各元素含量及其再吸收率均具有显著影响。在各海岸梯度上,K再吸收率为正值,且基干林带的再吸收率显著低于其它样地,Fe和Zn为负值,Ca、Mg和Na再吸收率在防护林带前沿为负值,而在后沿林为正值,Mn则相反。这表明,基干林带严重的环境胁迫显著降低了短枝木麻黄小枝的养分再吸收率。短枝木麻黄成熟小枝中的K、Mg含量与其再吸收率存在显著正相关,而Na和Fe与其再吸收率存在显著负相关,其它元素与其再吸收率之间没有显著相关性。除K外,各元素在衰老小枝中的含量与相应元素再吸收率之间均存在显著负相关,表明元素再吸收程度越高,其再吸收率就越高。Ca、Mg、Na和Fe再吸收率之间具有显著的正相关关系($P<0.01$),Zn除与Mn再吸收率呈显著正相关外,与其它元素均表现为负相关,Mn则与其它元素再吸收率之间没有显著相关性。因而短枝木麻黄小枝中不同类型的养分状况对其再吸收率具有不同的影响。表5 参42

关键词 海岸梯度;短枝木麻黄;金属元素;养分再吸收率

CLC Q945.79

Contents of Some Mineral Elements and Their Resorption Efficiencies in *Casuarina equisetifolia* Branchlets Across a Coastal Gradient*

WU Xilin¹, YE Gongfu², ZHANG Shangju⁴, LIN Yiming⁴ & ZHANG Lihua^{3**}

(¹Department of Geography, Minjiang College, Fuzhou 350108, China)

(²Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, China)

(³Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China)

(⁴School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract Contents of some mineral elements and their resorption efficiencies in *Casuarina equisetifolia* branchlets across a coastal gradient were studied at the Chishan Forestry Center of Dongshan County, Fujian Province, China. The results showed that the distance to coast had a significant effect on the contents of mineral elements and their resorption efficiencies. Resorption efficiencies of K element (RE_K) were all positive across the coastal gradient, with the lowest value found at the coastline sampling site, while Fe and Zn resorption efficiencies (RE_{Fe} and RE_{Zn}) were all negative across the coastal gradient. Ca, Mg and Na resorption efficiencies (RE_{Ca} , RE_{Mg} and RE_{Na}), which were contrary to Mn (RE_{Mn}), were negative in seaward plantations and positive in inland plantations. It was suggested that the resorption efficiencies of the mineral nutrients significantly decreased with severer environmental stresses. There were also significant positive correlations between the K and Mg content and their resorption efficiencies in mature branchlets while the correlations between the Na and Fe content and their resorption efficiencies were significantly negative. In senescent branchlets, the content of all the elements and their resorption efficiencies except for K were negatively correlated. In addition, the correlation was positive between RE_{Zn} and RE_{Mn} , while negative between RE_{Zn} and resorption efficiencies of other elements. No correlation was found between RE_{Mn} and resorption efficiencies of other elements. These results showed that nutrient conditions in branchlets had different effects on their resorption efficiencies for different mineral nutrients. Tab 5, Ref 42

Keywords coastal gradient; *Casuarina equisetifolia*; mineral element; nutrient resorption efficiency

CLC Q945.79

收稿日期: 2010-09-15 接受日期: 2010-10-11

*国家“十一五”重大科技支撑计划项目(No. 2009BADB2B0302)资助 Supported by the Major Sci-tech Pillar Program of the 11th 5-year-plan of China (No. 2009BADB2B0302)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: lh Zhang@yic.ac.cn)

养分再吸收 (Nutrient resorption) 是指养分从衰老叶片中转移并被运输到植物其它组织中的过程^[1-2]。生长在贫瘠生境植物群落中的多年生植物所需要的养分很大一部分是通过从衰老组织中再吸收获得的^[2-4]。养分再吸收不仅减小了植物对环境中养分的依赖, 提高了植物对养分贫瘠生境的适应性^[5], 而且使得凋落物分解时的养分淋溶量减少, 从而缓解养分从整个系统的损失^[6]。因此, 养分再吸收不仅是植物对养分贫瘠环境的一种适应机制^[7-9], 也是植物保存养分、增强竞争力、提高养分吸收能力和生产力的重要策略之一。影响植物养分再吸收的因素很多, 如遗传因素、元素在韧皮部的流动性和源库关系等, 而环境因子是对叶片衰老过程中养分再吸收率影响较大, 又容易被忽略的因素^[10]。

早在20世纪30年代, 科学家们就已经注意到养分在叶片衰老过程中存在着再吸收的现象^[1], 到目前仍有大量养分再吸收的研究报道^[4, 11]。迄今为止, 关于植物养分再吸收的研究主要见于欧美国家^[12], 我国从20世纪90年代初开始对杨树^[13-16]、沙地柏^[17]、樟子松^[6]、木麻黄^[18-20]和一些红树植物^[21-23]养分再吸收率的现状进行了研究。但由于通常认为氮和磷是限制森林生态系统植物生长的重要营养元素^[24], 因此, 以上关于养分再吸收的大部分研究主要针对氮和磷, 而对金属元素再吸收的研究较少。

木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 自20世纪50年代大规模引种到我国东南沿海营造防护林以来, 以其抗风、耐盐碱、耐干旱和耐贫瘠的优良特性成为我国东南沿海防护林的主要造林树种, 在防御沿海自然灾害、改善生态环境等方面发挥着巨大作用。木麻黄长期适应干旱缺水的滨海沙地环境, 使其形态结构特征发生了一系列的变化, 叶片严重退化成鳞片状, 由小枝 (叶状枝) 代替叶片行使光合、蒸腾等生理功能。在不同的海岸梯度 (从海边开始, 沿垂直于海岸线的方向向内陆延伸所形成的梯度) 上, 环境因子 (包括土壤质地、土壤养分含量及含水率等) 会发生相应的变化, 而风则是对这些变化产生直接或间接影响的重要驱动力^[25]。强风等综合因素所形成的环境条件对不同海岸梯度上的短枝木麻黄的生长产生不同程度的影响。滨海沙地营养条件极度贫瘠, 木麻黄能够正常生长并保持较高生产力, 必有其有效的适应机制, 而具有较高的养分再吸收率可能是其适应贫瘠立地条件的机制之一。另一方面, 木麻黄所处的滨海地区长期受到台风和风暴潮等恶劣气候的影响, 不同程度的环境胁迫也可能对其养分再吸收产生影响。Zhang等对不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝氮磷含量及其再吸收率进行了研究^[20], 本文则在此基础上探讨海岸梯度上不同程度的环境胁迫对短枝木麻

黄小枝金属元素再吸收的影响, 以揭示金属元素再吸收与短枝木麻黄生长状况之间的关系, 为短枝木麻黄防护林的可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在福建省东山县赤山林场 (118°18'E, 23°40'N), 位于福建东南部沿海, 属亚热带海洋性气候, 干、湿季节明显。年均降水量945 mm, 大部分降水集中在5~9月, 11月至翌年2月为旱季, 年均蒸发量1 056 mm, 年均气温为 20.8 °C, 绝对最高气温 36.6 °C, 绝对最低气温 3.8 °C, 终年无霜冻。秋冬多东北大风, 8级以上大风天数约 100 d, 夏季多为西南风, 台风多发生在7~8月, 年平均4~6次。土壤为潮积或风积沙土, 土壤肥力低。

本研究中, 从海边基干林带开始, 沿垂直于海岸线的方向, 按照离海洋由近到远的顺序向内陆每隔大约100 m选择一个样地, 共计6个, 分别记为梯度1至6。所选择的样地均为1989年或1992年种植的木麻黄人工纯林, 林下植被及凋落物稀少。6个样地的林分特征见表1。

1.2 样品采集

2007年3月, 在每个样地内选择20株生长状况一致的短枝木麻黄, 于树冠外侧进行随机取样。采集的木麻黄小枝包括成熟小枝和衰老小枝。成熟小枝是指位于枝条中部, 长度在15~30 cm之间, 呈深绿色的完全发育小枝。衰老小枝为灰色、干枯的小枝, 衰老小枝应取自植物体, 而不是在小枝凋落物中收集, 因为凋落物的分解和淋溶会导致衰老叶中的养分含量降低。将所取小枝样品置于80 °C烘箱中烘干至恒重, 用植物样品粉碎机粉碎, 并通过0.5 mm筛孔, 然后装于自封袋中备用。

同时, 在每个样地距地表20 cm处多点采集土壤样品, 混合后用四分法将部分土样带回实验室, 风干后剔除石块、植物根系及其它碎片, 过2 mm土壤筛用于土壤pH值的测定; 将过2 mm土壤筛的样品研磨后过0.25 mm土壤筛, 用于土壤全N和全P的测定。

1.3 分析方法

所有植物样品在测定养分含量前, 都要再次烘干8 h (70 °C), 冷却后立即称样, 然后进行其它操作。样品用HNO₃-HClO₄混合液消煮, 待测液用以测定钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg)、钠 (Na)、铁 (Fe)、锰 (Mn) 和锌 (Zn) 元素含量。其中, K和Na含量采用火焰光度计 (上海精密科学仪器有限公司, FP-640) 测定, Ca、Mg、Fe、Mn和Zn含量采用原子吸收

表1 不同海岸梯度上短枝木麻黄林分主要特征

Table 1 Some characters of the *Casuarina equisetifolia* stands across a coastal gradient

海岸梯度 Coastal gradient	林龄 Forest age (t/a)	胸径 DBH (d/cm)	树高 Height (h/m)	总氮 Total N (w/mg kg ⁻¹)	总磷 Total P (w/mg kg ⁻¹)	pH
1	18	9.9 (3.2)	6.7 (2.3)	24.12 (0.71)	4.08 (0.13)	4.14 (0.01)
2	15	10.6 (1.7)	9.6 (1.1)	45.63 (2.06)	2.94 (0.22)	4.29 (0.02)
3	15	12.7 (3.9)	12.6 (1.3)	55.47 (1.92)	2.45 (0.18)	4.16 (0.01)
4	15	9.6 (0.9)	13.8 (1.2)	51.83 (2.03)	2.26 (0.16)	4.36 (0.02)
5	18	13.1 (3.7)	12.3 (4.4)	66.81 (1.09)	4.07 (0.15)	4.13 (0.02)
6	18	18.4 (7.2)	16.3 (3.9)	58.95 (2.03)	3.06 (0.15)	4.38 (0.02)

括号内为标准差, 下同 Standard deviations of means are given in parenthesis. The same below

分光光度计(日本岛津AA-3800)测定。土壤全N、全P和pH值分别用重铬酸钾与硫酸硝化法、碳酸氢钠浸提法和pH值酸度计测定^[26]。

1.4 计算方法

元素再吸收率(RE)用从衰老叶中所吸收的元素含量占成熟叶中元素含量的百分率来计算^[2-3],其计算公式为: $RE = (A1-A2)/A1 \times 100\%$ 。其中, A1为成熟叶中的元素含量, A2为衰老叶中元素含量。

1.5 数据统计分析

采用SPSS for Windows 13.0进行统计分析。在单因素方差分析(One-Way ANOVA)的基础上,利用多重比较的方法(S-N-K),检验不同海岸梯度间短枝木麻黄小枝中元素含量和再吸收率的差异。

2 结果与分析

2.1 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝元素含量的变化

短枝木麻黄成熟和衰老小枝元素含量在不同海岸梯度上的变化如表2所示。成熟小枝K含量在基于林带的含量最低,在第二梯度最高,之后逐渐降低;衰老小枝K含量在梯度1到4之间的差异性不显著,均高于梯度5和6。成熟和衰老小枝中Ca含量均在梯度1样地中最高,从梯度2到6,成熟小枝Ca含量由最低值依次升高,而衰老小枝Ca含量呈波动性变化。成熟小枝Mg含量从梯度1到3依次升高,而在其他3个梯度之间差异不显著。衰老小枝中的Mg含量,以及成熟和衰老

小枝中的Na、Fe和Zn含量在各海岸梯度上具有相似的变化趋势,从梯度1的基于林带开始逐渐降低,而在梯度5或6有所升高。短枝木麻黄成熟和衰老小枝中的Mn含量则在基于林带较低,后沿林中较高。

在各海岸梯度上,成熟小枝K含量均高于衰老小枝,而Fe和Zn含量均较衰老小枝低。成熟和衰老小枝之间Mg和Na含量的变化相似,即在梯度1的基于林带中,成熟小枝均低于衰老小枝,而在其它梯度上均高于衰老小枝。成熟小枝Ca含量在梯度1到3和梯度4到6样地中分别低于和高于衰老小枝。Mn含量在小枝发育过程中的变化与Ca相反,即在梯度1到4样地中成熟小枝高于衰老小枝,而在梯度5和6中低于衰老小枝。

2.2 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝元素再吸收率的变化

短枝木麻黄小枝K再吸收率在梯度2到6样地中没有显著性差异,但均高于基于林带的梯度1(表3)。梯度1到3样地中小枝Ca再吸收率为负值,即Ca在衰老小枝中富集,而梯度4到6样地中小枝Ca再吸收率为正值。Mg和Na的变化趋势相似,在梯度1样地小枝中均表现为富集,在其他样地中存在再吸收现象,且在梯度2到5样地中没有显著性差异,均高于梯度6。Fe和Zn在各样地小枝衰老过程中均表现为富集,但变化趋势相反,Fe的富集程度由梯度1的基于林带向后沿林依次减弱,而Zn增强。梯度1到4样地短枝木麻黄小枝中的Mn存在再吸收现象,而在其他样地中呈富集状态。

表2 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝元素含量变化

Table 2 Changes in contents of elements in *C. equisetifolia* branchlets across a coastal gradient

元素 Element	发育阶段 Development stage	海岸梯度 Coastal gradient					
		1	2	3	4	5	6
K (w/mg g ⁻¹)	成熟小枝 Mature branchlets	2.64 (0.21) f	8.24 (0.16) a	5.61 (0.03) b	5.30 (0.12) c	3.99 (0.07) d	3.55 (0.08) e
	衰老小枝 Senescent branchlets	1.45 (0.19) g	1.48 (0.18) g	1.46 (0.11) g	1.29 (0.04) g	0.85 (0.07) h	0.97 (0.08) h
Ca (w/mg g ⁻¹)	成熟小枝 Mature branchlets	8.86 (0.22) b	4.12 (0.19) e	4.42 (0.32) e	8.13 (0.25) c	8.56 (0.33) bc	8.52 (0.27) bc
	衰老小枝 Senescent branchlets	14.76 (0.28) a	4.48 (0.29) e	5.50 (0.30) d	4.52 (0.50) e	5.55 (0.31) d	8.17 (0.10) c
Mg (w/mg g ⁻¹)	成熟小枝 Mature branchlets	1.43 (0.15) e	2.26 (0.03) c	2.56 (0.10) b	1.72 (0.02) d	1.67 (0.06) d	1.76 (0.07) d
	衰老小枝 Senescent branchlets	3.10 (0.10) a	1.59 (0.11) de	1.76 (0.07) d	1.27 (0.08) f	1.16 (0.07) f	1.58 (0.04) de
Na (w/mg g ⁻¹)	成熟小枝 Mature branchlets	7.57 (0.37) b	7.30 (0.26) b	6.70 (0.35) b	4.66 (0.16) d	3.55 (0.31) e	5.52 (0.23) c
	衰老小枝 Senescent branchlets	17.31 (1.23) a	3.33 (0.32) e	3.90 (0.37) de	2.03 (0.21) f	1.50 (0.04) f	4.55 (0.34) d
Fe (w/mg g ⁻¹)	成熟小枝 Mature branchlets	0.23 (0.01) d	0.18 (0.01) e	0.13 (0.01) f	0.09 (0.01) g	0.11 (0.01) fg	0.14 (0.01) f
	衰老小枝 Senescent branchlets	0.87 (0.05) a	0.32 (0.01) b	0.27 (0.01) c	0.19 (0.01) e	0.19 (0.01) e	0.23 (0.01) d
Mn (w/mg kg ⁻¹)	成熟小枝 Mature branchlets	0.52 (0.04) f	0.49 (0.04) f	1.38 (0.03) c	1.16 (0.12) d	0.96 (0.01) e	1.57 (0.06) b
	衰老小枝 Senescent branchlets	0.49 (0.03) f	0.32 (0.01) g	0.89 (0.05) e	0.97 (0.01) e	1.03 (0.07) e	2.05 (0.14) a
Zn (w/mg kg ⁻¹)	成熟小枝 Mature branchlets	52.83 (0.95) d	29.90 (4.62) ghi	26.97 (1.36) i	27.68 (2.10) hi	28.94 (2.29) ghi	35.91 (1.21) ef
	衰老小枝 Senescent branchlets	59.44 (0.65) c	38.51 (1.47) e	32.05 (2.53) fgh	32.68 (1.24) fg	80.24 (0.84) a	74.28 (1.24) b

不同字母表示不同海岸梯度之间的差异显著性,下同 Different letters indicate significant differences between coastal gradients. The same below

表3 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝元素再吸收率变化
Table 3 Changes in resorption efficiencies of elements in *C. equisetifolia* branchlets across a coastal gradient

元素 Element	海岸梯度 Coastal gradient					
	1	2	3	4	5	6
K	44.57 (9.81) b	82.10 (1.93) a	73.92 (1.73) a	75.71 (0.24) a	78.62 (1.60) a	72.80 (7.69) a
Ca	-66.65 (5.11) d	-8.84 (3.47) e	-24.67 (5.66) f	44.45 (5.21) a	35.10 (4.99) b	4.06 (2.74) c
Mg	-118.04 (27.26) c	29.43 (5.69) a	31.02 (3.84) a	26.10 (3.93) a	30.48 (6.53) a	10.12 (5.69) b
Na	-129.60 (27.49) c	54.34 (5.82) a	41.84 (2.58) a	56.45 (3.02) a	57.73 (4.47) a	17.62 (4.69) b
Fe	-282.43 (19.31) c	-75.83 (11.73) ab	-108.77 (16.55) b	-100.66 (13.81) ab	-65.43 (11.59) a	-64.04 (19.19) a
Mn	8.46 (2.98) c	34.28 (3.80) a	35.49 (3.06) a	20.75 (1.47) b	-3.92 (0.59) d	-30.69 (8.13) e
Zn	-12.53 (2.69) a	-40.38 (4.79) b	-18.90 (8.94) ab	-18.43 (8.04) ab	-178.38 (21.73) d	-106.93 (3.98) c

2.3 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝元素含量与再吸收率之间的相关性

由表4可见, 在成熟小枝中, K和Mg含量与其再吸收率之间存在显著正相关 ($P<0.01$), Na ($P<0.05$) 和Fe ($P<0.01$) 则呈显著的负相关关系, 其他元素与其再吸收率之间没有显著相关性 ($P>0.05$). 而在衰老小枝中, 除K含量与其再吸收率之间的相关性不显著 ($P>0.05$) 之外, 其他元素含量与其再吸收率之间均呈显著负相关 ($P<0.001$).

2.4 短枝木麻黄小枝各元素再吸收率之间的相关性

短枝木麻黄小枝在衰老过程中, 不同元素再吸收率之间存在不同的相关性 (表5). Mn与其他各元素再吸收率之间以及Zn与K、Mg和Na再吸收率之间均没有显著相关性 ($P>0.05$), Zn与Ca和Fe再吸收率之间具有显著负相关关系 ($P<0.05$). 除此之外, 其他各元素再吸收率之间均存在显著正相关关系.

是许多环境因素, 如土壤性质、季节长度、水分供应和其它环境因子作用的结果. 在本研究中, 海岸梯度对短枝木麻黄成熟和衰老小枝中金属元素的含量均有显著影响, 但对不同类型元素的影响程度存在差异. 由于客观条件的限制, 本研究中各海岸梯度上的林分包括15 a生和18 a生两种林龄, 不过有研究表明, 不同林龄树种之间叶片养分含量没有必然的显著性差异, 即使存在差异, 也主要与不同地区土壤中的养分状况有关^[6, 27].

海岸梯度对短枝木麻黄小枝元素再吸收率也具有显著影响. 其中, K在各海岸梯度上的再吸收率均为正值, 且基于林带 (梯度1) 的再吸收率显著低于其它样地. 与本文的研究结果相似, Oleksyn等也认为, 与N和P相比, K具有很强的移动性, 即具有较高的再吸收率^[28]. Robert等^[29]和Helmisaari等^[30]的研究表明, Ca、Fe、Mn和Zn在衰老叶中存在富集现象. Hagen-Thorn等的研究则表明, 不同物种之间的养分再吸收率存在差别, 除垂枝桦 (*Betula pendula* Roth.) 叶片Ca再吸收率为负值之外, 其它物种, 如北美红栎 (*Quercus robur* L.)、欧洲小叶槭 (*Tilia cordata* Mill.) 和欧洲白蜡树

3 讨论

叶片中的养分浓度反映了树木的营养状况, 而营养状况

表4 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝元素含量与再吸收率之间的相关性
Table 4 Correlations between contents of elements in *C. equisetifolia* branchlets and their resorption efficiencies across a coastal gradient

x-y	成熟小枝 Mature branchlet			衰老小枝 Senescent branchlet		
	方程 Equation	r	P	方程 Equation	r	P
K-RE _K	$y = 4.703x + 48.289$	0.652	0.003	$y = -17.722x + 93.442$	-0.385	0.115
Ca-RE _{Ca}	$y = 3.259x - 25.905$	0.177	0.483	$y = 7.824x + 53.288$	-0.757	0.000
Mg-RE _{Mg}	$y = 84.083x - 158.200$	0.596	0.009	$y = -80.236x + 141.408$	-0.939	0.000
Na-RE _{Na}	$y = -24.018x + 157.717$	-0.523	0.026	$y = -12.310x + 83.316$	-0.992	0.000
Fe-RE _{Fe}	$y = -1166.286x + 57.673$	-0.686	0.002	$y = -305.003x - 10.538$	-0.952	0.000
Mn-RE _{Mn}	$y = -22.611x + 33.628$	-0.397	0.103	$y = -33.571x + 42.357$	-0.801	0.000
Zn-RE _{Zn}	$y = 1.616x - 117.068$	0.243	0.331	$y = -2.608x + 76.740$	-0.819	0.000

表5 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝各元素再吸收率之间的相关性
Table 5 Correlations among resorption efficiencies of elements in *C. equisetifolia* branchlets across a coastal gradient

	RE _K	RE _{Ca}	RE _{Mg}	RE _{Na}	RE _{Fe}	RE _{Mn}
RE _{Ca}	0.713 (**)	—	—	—	—	—
RE _{Mg}	0.945 (***)	0.755 (***)	—	—	—	—
RE _{Na}	0.958 (***)	0.801 (***)	0.991 (***)	—	—	—
RE _{Fe}	0.902 (***)	0.774 (***)	0.945 (***)	0.933 (***)	—	—
RE _{Mn}	0.108 (0.668)	-0.172 (0.495)	0.142 (0.575)	0.160 (0.526)	-0.116 (0.648)	—
RE _{Zn}	-0.363 (0.139)	-0.494 (*)	-0.330 (0.181)	-0.339 (0.168)	-0.512 (*)	0.636 (**)

* $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$

(*Fraxinus excelsior* L.)的Ca和Mg再吸收率均为正值,其中,欧洲白蜡树的Ca和Mg再吸收率分别达19.9%和26.4%,4种物种Fe和Mn的再吸收率分别为7.5%~30%和2.5%~12%^[24]。本研究与上述研究结果均有所差别,Ca再吸收率在梯度1到3为负值,而在梯度4到6为正值,Fe和Zn则在各海岸梯度上均表现为富集(再吸收率为负值),但从梯度1到6,Fe的富集程度逐渐减弱,而Zn的富集程度有所加强,Mn再吸收率则在林带前沿(梯度1到4)为正值,在梯度5和6样地中为负值,与此相反,Mg和Na的再吸收率在基干林带(梯度1)均为负值,而在梯度2到6存在较高的再吸收。邹邦基和何雪辉认为,Mg是植物体内流动性较大、重新利用程度较高的元素之一,当植物体内Mg缺乏时,Mg可以较顺利地老的器官,如正在衰老的叶片再吸收到植物所需要的器官中,当供应充足时,衰老器官中的Mg含量就有可能高于幼嫩器官^[31]。因此,不同物种之间和不同程度的环境胁迫均会导致元素再吸收率产生差异。本研究中,基干林带的短枝木麻黄由于受到强风等环境因子的严重胁迫,导致植株矮化,小枝存在水肿、叶绿素失绿和提早衰老现象,这可能是造成基干林带短枝木麻黄小枝元素再吸收率较低和存在富集现象的原因。

尽管有报道成熟叶中的养分浓度与其再吸收率之间具有正相关关系^[12, 32],但也有研究者认为,养分再吸收率与成熟叶养分浓度之间没有必然的联系^[2, 33-34],Kobe等甚至发现,无论在种内还是种间,叶片中养分含量的升高会导致再吸收率的下降^[35]。在本研究中,短枝木麻黄成熟小枝中的K、Mg含量与其再吸收率存在显著正相关,而Na和Fe与其再吸收率存在显著负相关,其他元素与它们的再吸收率之间没有显著相关性;而各元素在衰老小枝中的含量与相应元素再吸收率之间均存在显著负相关(K除外)。Kutbay等的研究则表明,养分再吸收率分别与成熟叶和衰老叶中的养分含量存在负相关和正相关关系^[36]。因此,植物叶片中的元素含量与其再吸收率之间没有必然的相关性,特定类型的元素在不同物种中和不同环境条件下可能有不同的表现。

植物对不同营养元素的吸收具有均衡性^[37]。在本研究中,Ca、Mg、Na和Fe再吸收率之间具有显著的正相关关系($P<0.01$),表明4种元素在同一海岸梯度上的再吸收或富集程度具有相似的变化趋势,对立地条件的影响具有相同的响应。Zn除了与Mn再吸收率呈显著正相关外,与其他元素均表现为负相关,表明Zn较高的富集程度可能会促进其他元素的再吸收。Mn则与其他元素再吸收率之间没有显著相关性。

养分再吸收直接影响叶片的分解特性,例如叶片凋落物中的养分含量决定着其通过分解归还到土壤中的养分量^[38],较高的养分再吸收程度导致凋落物分解率和养分释放率降低^[39],有研究表明,短枝木麻黄小枝和细根的分解率都很低,而细根生物量很高^[40-42]。因此,木麻黄可能通过从土壤中大量吸收养分,提高衰老小枝中养分的再吸收程度,降低凋落物的分解率,减少养分的损失来增强竞争优势,从而适应贫瘠的均一性风积沙土的立地条件。但是,沿海防护林前沿的基干林带由于受到恶劣环境条件的胁迫,使短枝木麻黄小枝受到伤害,功能受损,会影响其养分再吸收。因此,在贫瘠的滨海沙地上应选择再吸收率较高的“营养保存型”耐瘠

薄和能够抵御恶劣环境因子的抗性较强树种,从而丰富沿海防护林的造林树种,提高防护效益。

References

- 1 Killingbeck KT. The terminological jungle revisited: making a case for use of the term resorption. *Oikos*, 1986, **46** (2): 263~264
- 2 Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: Are there general patterns? *J Ecol*, 1996, **84** (4): 597~608
- 3 Killingbeck KT. Nutrients in senesced leaves: Keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. *Ecology*, 1996, **77** (6): 1716~1727
- 4 van Heerwaarden LM, Toet S, Aerts R. Nitrogen and phosphorus resorption efficiency and proficiency in six sub-arctic bog species after 4 years of nitrogen fertilization. *J Ecol*, 2003, **91** (6): 1060~1070
- 5 Aerts R, Cornelissen JHC, van Logtestijn RSP, Callaghan, TV. Climate change has only a minor impact on nutrient resorption parameters in a high-latitude peatland. *Oecologia*, 2007, **151** (1): 132~139
- 6 Zeng DH (曾德慧), Chen GS (陈广生), Chen FS (陈伏生), Zhao Q (赵琼), Ji XY (冀小燕). Foliar nutrient and their resorption efficiencies in four *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations of different ages on sandy soil. *Sci Sil Sin* (林业科学), 2005, **41** (5): 21~27
- 7 Aerts R. Nutrient use efficiency in evergreen and deciduous species from heathlands. *Oecologia*, 1990, **84** (3): 391~397
- 8 May JD, Killingbeck KT. Effects of preventing nutrient resorption on plant fitness and foliar nutrient dynamics. *Ecology*, 1992, **73** (5): 1868~1878
- 9 Santa RI, Rico M, Rapp M, Gallego HA. Seasonal variation in nutrient concentration in leaves and branches of *Quercus pyrenaica*. *J Veg Sci*, 1997, **8** (5): 651~654
- 10 Wang WQ (王文卿), Lin P (林鹏). Studies on the nutrient retranslocation efficiencies during leaf senescence. *J Wuhan Bot Res* (武汉植物学研究), 1999, (Suppl): 117~122
- 11 Lal CB, Annapurna C, Raghubanshi AS, Singh JS. Effect of leaf habit and soil type on nutrient resorption and conservation in woody species of a dry tropical environment. *Can J Bot*, 2001, **79** (9): 1066~1075
- 12 Yuan ZY, Li LH, Han XG, Huang, JH, Jiang, GM, Wan, SQ, Zhang WH, Chen QS. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China. *J Arid Environ*, 2005, **63** (1): 191~202
- 13 Chen X (陈欣), Yu WT (宇万太), Zhang L (张璐), Yin XY (殷秀岩), Shen SM (沈善敏). Comparative study on internal and external nutrient cyclings of poplar tree under different fertilizations II. Effect of fertilization on concentration and storage of major nutrients in poplar leaves before and after leaf fallen. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1995, **6** (4): 346~348
- 14 Shen SM (沈善敏), Yu WT (宇万太), Zhang L (张璐), Lian HZ (廉鸿志). Internal and external nutrient cyclings of poplar tree I. Changes of nutrient storage in different parts of poplar tree before and after fallen. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1992, **3** (4): 296~301
- 15 Shen SM (沈善敏), Yu WT (宇万太), Zhang L (张璐), Lian HZ (廉鸿志). Internal and external nutrient cyclings of poplar tree II.

- Transferring and cycling of nutrients in and out of the tree before and after leaf fallen. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1993, **4** (1): 27~31
- 16 Yu WT (宇万太), Chen X (陈欣), Zhang L (张璐), Yin XY (殷秀岩), Shen SM (沈善敏). Comparative study on internal and external nutrient cyclings of poplar tree under different fertilizations I. Effect of fertilization on biomass of poplar tree and its internal and external cycling of N before and after leaf fallen. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1995, **6** (4): 341~345
- 17 He WM (何维明), Zhang XS (张新时). Response of *Sabina vulgaris* to nutrient responses in the contrasting habitats in the Mu Us sandland. *Sci Sil Sin* (林业科学), 2002, **38** (5): 1~6
- 18 Zhang LH (张立华), Lin YM (林益明), Ye GF (叶功富), Yin L (殷亮), Zhou HC (周海超). Nitrogen and phosphorus concentrations, N:P ratio and resorption efficiency of leaves in different forest types. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 2009, **31** (5): 67~71
- 19 Ye GF (叶功富), Zhang LH (张立华), Lin YM (林益明), Wang H (王亨), Zhou HC (周海超), Zeng Q (曾琦). Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus concentrations, and nutrient resorption efficiencies of *Casuarina equisetifolia* branchlets in Dongshan County, Fujian. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, **29** (12): 6519~6526
- 20 Zhang LH, Lin YM, Ye GF, Liu XW, Lin GH. Changes in the N and P concentrations, N:P ratios, and tannin content in *Casuarina equisetifolia* branchlets during development and senescence. *J For Res*, 2008, **13** (5): 302~311
- 21 Lin YM, Peng ZQ, Lin P. Dynamics of leaf mass, leaf area and element retranslocation efficiency during leaf senescence in *Phyllostachys pubescens*. *Acta Bot Sin*, 2004, **46** (11): 1316~1323
- 22 Lin YM, Sternberg LDL. Nitrogen and phosphorus dynamics and nutrient resorption of *Rhizophora mangle* leaves in south Florida, USA. *Bull Mar Sci*, 2007, **80** (1): 159~169
- 23 Wang WQ, Wang M, Lin P. Seasonal changes in element contents in mangrove element retranslocation during leaf senescence. *Plant Soil*, 2003, **252** (2): 187~193
- 24 Hagen-Thorn A, Varnagiryte I, Nihlgard B, Armolaitis K. Autumn nutrient resorption and losses in four deciduous forest tree species. *For Ecol Manage*, 2006, **228** (1~3): 33~39
- 25 Lortie CJ, Cushman JH. Effects of a directional abiotic gradient on plant community dynamics and invasion in a coastal dune system. *J Ecol*, 2007, **95** (3): 468~481
- 26 Zhang XP (张雪萍), Li CY (李春艳), Yin XQ (殷秀琴), Chen P (陈鹏). Relation between soil animals and nutrients in the differently used forest lands. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 1999, **5** (1): 26~31
- 27 Li RH (李荣华), Wang SL (汪思龙), Wang QK (王清奎). Nutrient contents and resorption characteristics in needles of different age *Pinus massoniana* (Lamb.) before and after withering. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2008, **19** (7): 1443~1447
- 28 Oleksyn J, Reich PB, Zytkowski R, Karolewski P, Tjoelker MG. Needle nutrients in geographically diverse *Pinus sylvestris* L. population. *Ann Forest Sci*, 2002, **59**: 1~18
- 29 Robert B, Caritat AGB, Vilar L, Molinas M. Nutrient content and seasonal fluctuations in the leaf component of cork-oak (*Quercus suber* L.) litterfall. *Vegetatio*, 1996, **122**: 29~35
- 30 Helmisaari HS. Nutrient retranslocation within the foliage of *Pinus sylvestris*. *Tree Physiol*, 1992, **10** (1): 45~58
- 31 Zou BJ (邹邦基), He XH (何雪辉). Nutrition of Plant. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 1985. 191~202
- 32 Fife DN, Nambiar EKS, Saur E. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. *Tree Physiol*, 2008, **28** (2): 187~196
- 33 Del Arco JM, Escudero A, Garrido VM. Effects of site characteristics on nitrogen retranslocation from senescing leaves. *Ecology*, 1991, **72** (2): 701~708
- 34 Wright IJ, Westoby M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: Leaf traits of Australian sclerophyll species. *Funct Ecol*, 2003, **17** (1): 10~19
- 35 Kobe RK, Lepczyk CA, Iyer M. Resorption efficiency decreases with increasing green leaf nutrients in a global data set. *Ecology*, 2005, **86** (10): 2780~2792
- 36 Kutbay HG, Ok T, Bilgin A, Yalcin E. Seasonal nutrient levels and foliar resorption in *Juniperus phoenicea*. *Belg J Bot*, 2005, **138** (1): 67~75
- 37 Knecht MR, Goransson A. Terrestrial plants require nutrients in similar proportions. *Tree Physiol*, 2004, **24** (4): 447~460
- 38 Quedstedt HM, Cornelissen JHC, Press MC, Callaghan TV, Aerts R, Trosien F, Riemann P, Gwynn-Jones D, Kondratchuk A, Jonasson SE. Decomposition of sub-arctic plants with differing nitrogen economies: A functional role for hemiparasites. *Ecology*, 2003, **84** (12): 3209~3221
- 39 Moretto AS, Distel RA. Decomposition of and nutrient dynamics in leaf litter and roots of *Poa ligularis* and *Stipa gyneriodes*. *J Arid Environ*, 2003, **55** (3): 503~514
- 40 Ye GF (叶功富), Long XW (隆学武), Pan HZ (潘惠忠), Xu JS (徐俊森), Lin WX (林武星), Zhu W (朱炜), Huang CY (黄传英). Dynamics of litter and its decomposition in *Casuarina equisetifolia* plantation. *Prot For Sci Tech* (防护林科技), 1996 (Special Issue): 30~34, 76
- 41 Zhang LH (张立华), Ye GF (叶功富), Lin YM (林益明), Hou J (侯杰), Lu CY (卢昌义), Zeng GQ (曾国强). Production, decomposition and turnover of fine roots in *Casuarina equisetifolia* plantation. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2008, **16** (1): 20~24
- 42 Ye GF (叶功富), Zhang LH (张立华), Hou J (侯杰), Lu CY (卢昌义), Wu LQ (吴柳清), Li XM (李秀明). Fine root biomass and dynamics of *Casuarina equisetifolia* plantations on coastal sandy soil. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2007, **13** (4): 481~485