



不同海岸距离上木麻黄凋落叶金属元素含量及归还量动态特征

袁 锋^{1,2} 王艳艳^{1,2} 李茂瑾³ 江传阳⁴ 刘贺娜^{1,2} 李坤玲^{1,2} 洪 滔^{1,2}
吴承祯⁵ 陈 灿^{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福建省惠安赤湖国有防护林场, 福建泉州 362200; ⁴福建省晋江站头国有防护林场, 福建泉州 362200; ⁵武夷学院生态与资源工程学院, 福建南平 354300

摘 要 精确估算生态系统内部环境梯度引起的养分循环差异, 对评估其生态功能十分重要。为探讨不同距海生境对木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)凋落叶金属元素含量及养分归还动态的影响, 以福建省惠安赤湖国有防护林场木麻黄凋落叶为研究对象, 按照离海由近及远的顺序设置5个距离(T₁到T₅), 收集凋落叶测定金属元素含量。结果表明: 1)海岸梯度环境对木麻黄凋落叶各元素含量及归还量具有显著影响, 由基干林带向林内元素含量、归还量呈线性规律, 总体上近海高于远海, 按照离海由近及远元素含量逐渐降低, 铁(Fe)、铜(Cu)、锌(Zn)和锰(Mn)在T₄后上升, 归还量变化趋势与含量相似。2)凋落叶元素含量在不同月份存在显著差异, Na、Fe、Cu、Zn具有相似性, 6月、11月存在明显低谷; Mn在2至4月下降后波动上升。归还量总体表现为钠(Na)、Cu相似, 5、8、次年1月出现峰值; Mn、Fe、Zn相似, 5、8、11、次年1月出现峰值。3)土壤Na含量按照离海由近及远逐渐降低, 其他元素波动变化, 各距离之间差异不明显。4)凋落叶Na-Fe含量存在显著正相关关系, Na-Zn、Fe-Cu、Fe-Zn含量存在极显著正相关关系; 土壤与凋落叶相同元素含量间存在正相关关系, Na和Cu达到显著水平。究其原因, 叶片元素含量差异受叶凋落时间差异造成的重吸收差异影响大; 月间差异因植物生命活动对元素需求量存在差异; 归还量差异与凋落叶量及元素含量有关。

关键词 木麻黄; 凋落叶; 金属元素; 养分含量; 养分归还量; 海岸环境

袁锋, 王艳艳, 李茂瑾, 江传阳, 刘贺娜, 李坤玲, 洪滔, 吴承祯, 陈灿 (2020). 不同海岸距离上木麻黄凋落叶金属元素含量及归还量动态特征. 植物生态学报, 44, 819–827. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0091

Dynamic characteristics of metal element content and return of *Casuarina equisetifolia* litter at different distances to the coastline

YUAN Feng^{1,2}, WANG Yan-Yan^{1,2}, LI Mao-Jin³, JIANG Chuan-Yang⁴, LIU He-Na^{1,2}, LI Kun-Ling^{1,2}, HONG Tao^{1,2}, WU Cheng-Zhen⁵, and CHEN Can^{1,2*}

¹College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ²Collegiate Key Lab of Forest-Ecosystem Process and Management in Fujian, Fuzhou 350002, China; ³Chihu State-owned Protective Forest Farm of Huian, Fujian Province, Quanzhou, Fujian 362200, China; ⁴Diantou State-owned Protective Forest Farm of Jinjiang, Fujian Province, Quanzhou, Fujian 362200, China; and ⁵College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping, Fujian 354300, China

Abstract

Aims Accurate estimation of the variation of nutrient cycling along environmental gradients within an ecosystem is important for assessing their ecological functions. The aim of this study is to explore the effects of different habitats on the metal element content and nutrient return dynamics of *Casuarina equisetifolia*.

Methods Taking the litter of *C. equisetifolia* in Chihu State-owned Protective Forest Farm of Huian, Fujian Province as the research object. Five distances named T₁, T₂, T₃, T₄ and T₅ respectively, were selected in order of near to far from the coastline, and the litter was collected to determine the metal element content.

Important findings We found that: 1) Different coastal distances had significant effects on the content and return of each element of *C. equisetifolia* litter. The element content and return from the forest edge zone to interior forest were linear. In order of near to far from the coastline, sodium (Na) content gradually decreases. Iron (Fe),

收稿日期Received: 2020-03-31 接受日期Accepted: 2020-07-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD060130403)、福建省林业科技项目(闽林科便函(2018)26号)和福建省教育厅科研项目(JT180134)。Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFD060130403), the Fujian Forestry Science and Technology Project (Minlin Branch Letter (2018) No. 26), and the Scientific Research Project of Fujian Provincial Department of Education (JT180134).

* 通信作者Corresponding author (canchen@fafu.edu.cn)

copper (Cu), zinc (Zn) and manganese (Mn) increased since T₄, and their changing trend and amount of the return and content along the gradient were similar. 2) There were significant differences on the content of litter elements among different months. Litter Na, Fe, Cu, and Zn had similarities, and had lowest value in June and November. Litter Mn fluctuated after falling from February to April. The return amount was generally similar between litter Na and Cu, with peaks in May, August, and next January; Litter Mn, Fe, and Zn showed similar return amount, with peaks in May, August, and next January. 3) Na content in soils at different distances from the coastline decreased gradually, while other elements fluctuated and did not show significant difference along the gradient. 4) Litter Na and Fe were significantly positively correlated, and litter Na and Zn, Fe and Cu, and Fe and Zn were extremely significantly positively correlated, respectively. There was a positive correlation for the same element between soil and litter and the correlation was significant for Na and Cu. The difference in litter element was greatly affected by the difference in resorption rate during litter falling at different timing along the distance gradient. The temporal difference among different months was due to the requirements from plant life activity. The difference in the return of the element was related to the amount of litterfall and the content of elements in the litter.

Key words *Casuarina equisetifolia*; litter; metal elements; nutrient content; nutrient return; coastal environment

Yuan F, Wang YY, Li MJ, Jiang CY, Liu HN, Li KL, Hong T, Wu CZ, Chen C (2020). Dynamic characteristics of metal element content and return of *Casuarina equisetifolia* litter at different distances to the coastline. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 819–827. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0091

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分,在养分循环、能量流动过程中起着至关重要的作用。植被生长所利用的矿质元素,超过60%来自凋落物归还土壤的营养元素,凋落物养分释放速率及养分归还量受凋落物起始养分含量的影响(Chapin *et al.*, 2002; 彭少麟和刘强, 2002; 阎恩荣等, 2008),因此凋落物养分归还研究具有重要意义。

前人开展了大量凋落物和养分归还研究。Embermayer (1876)阐述了森林凋落物在养分循环中的重要性后,此类研究大量增加,近年来更加活跃,例如Lado-Monserrat等(2016)对地中海松林, Pereira等(2016)对亚马孙热带森林,卢晓强等(2014)对喀斯特地区,莫江明等(2004)对鼎湖山,张远东等(2019)对川西亚高山地区的森林凋落物相继开展研究。当前对凋落物的研究主要集中于陆地内部森林植被大量元素及生态化学计量比等方面,值得注意的是,环境越恶劣,森林生态系统对凋落物的依赖程度越高,然而当前对生态系统脆弱但对我国却十分重要的沿海防护林系统以及金属元素研究较少(贾丙瑞, 2019)。植物生长所需的营养元素超过16种,其中金属元素含量虽少,但作用不可替代,如钠(Na)、铜(Cu)在光合作用,锰(Mn)在叶绿体生成,铁(Fe)、锌(Zn)在多种酶(氧化还原酶、脱氢酶等)的合成等方面不可或缺(袁玉信, 1996)。同时金属元素含量能够影响凋落物分解的速率(贾丙瑞, 2019),因此须重视脆弱生态系统凋落物金属元素的研究。

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)人工林是我国

东南沿海主要防护林,在防风固沙等方面起着重要作用,但生长环境恶劣,特别是我国东南沿海受风沙影响大,土壤养分含量低,因此,凋落物返还是保持和提高木麻黄林土壤养分的重要途径。从海岸向内陆过渡的短距离内,防护林防风效应、树冠特征等因海岸梯度环境因子(风力、土壤本底值等)差异和胁迫发生变化,不同程度的环境胁迫使得防护林的内部结构、功能、养分循环并不均匀(吴锡麟等, 2011)。若忽视海陆过渡环境变化对防护林的影响,则无法精确估算其内部养分循环和深入研究该森林生态系统结构和功能。当前,此类研究尚未深入。因此,本研究通过对海岸梯度凋落叶金属元素含量及归还量进行研究,揭示其对海岸梯度环境的响应及月动态规律,以期为滨海沙地木麻黄人工防护林的可持续经营提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省惠安赤湖国有防护林场(24.58° N, 118.92° E),属南亚热带海洋性气候,年平均气温20 °C,年温差达30 °C,无霜期320天,年降水量1 029 mm,台风、暴雨集中在夏季7、8月份,年蒸发量达2 000 mm,干湿季极为明显且干旱频度大。夏季多西南风,秋冬多东北风,8级以上的大风天达105天,风口位于距高潮线20 m的基干林带前沿。地形平缓,海拔最高4 m,坡度0°–10°,土壤主要为风积沙土,土层厚度60–80 cm,肥力低。试验地

为人工营造的木麻黄纯林,“十五”期间建立了固定生态定位观察点,不受人为干扰(谭芳林, 2003)。

1.2 样地设置

于2018年1月,沿垂直于海岸线方向,从基干林带开始按照离海由近及远的顺序设置5个样地,分别距海岸线30 (T₁)、60 (T₂)、90 (T₃)、120 (T₄)和150 m (T₅),前期进行调查,防止出现样地内缺失木麻黄树木的状况,样地内木麻黄均为27年生,林下灌木、草本植物稀少,凋落物厚度约2–4 cm,为避免相邻样地凋落物发生干扰,相邻样地间隔10 m,另在离海300 m的木麻黄林内设置对照(T_{CK}),在每个距离上与海岸线平行方向随机加局部控制(郁闭度、健康树木)设置3个样方(5 m × 5 m),样方内按随机加局部控制(郁闭度)设置3个聚乙烯塑料材质的尼龙网制作的凋落物收集框,考虑到沿海大风及木麻黄针叶的特点,每个框为0.5 m × 0.5 m,框网孔径1 mm,离地0.5 m。各样地的林分特征等信息见表1。

1.3 样品收集及测定

于2018年2月到2019年1月,每月下旬晴好天气采用直接收集法收集凋落物,共收集12次,剔除杂质后,分拣凋落叶,称取鲜质量后85 °C烘干至恒质量,称取干质量,粉碎后过0.149 mm筛。在每个距离上采用5点取样法采集1–10 cm表层土壤500 g,共30个样本,风干后剔除杂质过0.149 mm筛。每个样品称取0.2 g,设置3个重复以及空白样品进行质量控制,凋落叶用H₂SO₄-H₂O₂,土壤用硝酸-氢氟酸-高氯酸在数显温控消化炉进行消解后运用等离子体发射光谱仪(ICP-OES, PekinElmer, Waltham, USA)分析测定Na、Mn、Fe、Cu、Zn元素含量(张志祥等, 2010)。

1.4 计算方法与数据处理

各距离元素含量为12个月的平均含量,月含量用距离均值表示。养分归还量为单位面积内凋落叶

量与养分含量的乘积(阎恩荣等, 2008),各距离元素归还量为12个月的平均含量;月归还量为当月元素含量与凋落叶量乘积,同样用距离均值表示;土壤元素含量用5个样点均值表示。统计分析用Excel 2016和SPSS 25,在单因素方差分析的基础上,利用最小显著差异(LSD)法分析检验不同海岸距离、不同月份凋落叶金属元素含量及养分归还量的差异。对不同海岸距离养分含量及归还量进行线性回归分析。用Pearson法对元素含量之间及与土壤元素含量进行相关分析。运用Origin Pro 2018作图。

2 结果和分析

2.1 不同海岸距离木麻黄凋落叶金属元素含量动态变化

木麻黄凋落叶金属元素含量在不同海岸距离存在差异(表2)。由基干林带向林内Na含量逐渐降低;Fe、Cu和Zn含量由T₁到T₄逐渐降低,T₄后上升;Mn含量由T₁到T₂上升,T₂到T₄逐渐下降,T₄后上升。Na含量在T₁到T₃、T₄与T₅之间差异性不显著($p > 0.05$);Mn含量距离之间总体差异显著($F = 64.751, p < 0.001$);Cu含量在T₁与T₃、T₄、T_{CK},T₂与T₄之间差异显著($p < 0.05$);Fe含量在T₁与T₃、T₄、T₅、T_{CK}间存在显著差异($p < 0.05$);Zn含量仅在T₁与T_{CK}之间存在显著差异($p < 0.05$)。最小值,Na含量出现于T_{CK},其他元素均出现于T₄;最大值,Na、Fe、Cu含量出现于T₁,Mn、Zn含量出现于T_{CK}。随着离海距离的增加,元素含量变化表现出一定的线性规律(表3)。

另外,从图1可见,木麻黄凋落叶金属元素含量均有显著的月际动态变化。Na、Fe、Cu、Zn含量变化相似,2至6月逐月下降,6至10月波动上升,11月出现低谷;2至4月Mn含量逐月下降后波动上升。Na、Fe、Zn最大值出现于1月(6.479 3、0.262 1、0.202 9 g·kg⁻¹);Fe最小值出现于5月(0.137 1 g·kg⁻¹),Na和

表1 福建海岸采样点木麻黄林基本特征(平均值±标准偏差)

Table 1 Basic characteristics of *Casuarina equisetifolia* at different distances to Fujian coastline (mean ± SD)

海岸距离 Coastal distance (m)	树高 Tree height (m)	胸径 Diameter at breast height (cm)	冠幅 Crown width (m)	风速 Wind speed (m·s ⁻¹)	密度 Density (trees·hm ⁻²)
30 (T ₁)	10.67 ± 1.68	17.34 ± 1.08	3.65 ± 0.11	7.8 ± 1.11	2 350
60 (T ₂)	11.70 ± 1.03	14.19 ± 4.48	3.98 ± 0.98	7.2 ± 0.97	2 150
90 (T ₃)	12.93 ± 0.94	20.57 ± 1.27	4.22 ± 1.17	6.4 ± 0.86	1 850
120 (T ₄)	13.53 ± 1.37	18.64 ± 3.89	3.75 ± 0.95	5.8 ± 0.65	1 700
150 (T ₅)	13.40 ± 1.21	19.27 ± 4.16	3.52 ± 0.87	5.3 ± 0.76	1 600
300 (T _{CK})	13.53 ± 1.49	25.39 ± 9.01	5.37 ± 1.57	4.3 ± 0.66	1 550

表2 不同海岸距离木麻黄凋落叶金属元素含量(g·kg⁻¹)(平均值±标准偏差)

Table 2 Contents of metal elements in *Casuarina equisetifolia* litters at different distances to the coastline (g·kg⁻¹)(mean ± SD)

海岸距离 Coastal distance (m)	Na	Mn	Fe	Cu	Zn
30 (T ₁)	6.091 ± 1.135 ^a	0.067 ± 0.020 ^c	0.267 ± 0.110 ^a	0.0043 ± 0.002 ^a	0.020 ± 0.003 ^b
60 (T ₂)	5.327 ± 1.346 ^a	0.093 ± 0.033 ^b	0.226 ± 0.113 ^{ab}	0.0036 ± 0.002 ^{ab}	0.016 ± 0.003 ^{ab}
90 (T ₃)	5.084 ± 1.431 ^a	0.078 ± 0.014 ^{bc}	0.175 ± 0.059 ^b	0.0027 ± 0.002 ^{bc}	0.016 ± 0.004 ^{ab}
120 (T ₄)	4.408 ± 1.689 ^b	0.063 ± 0.011 ^c	0.168 ± 0.062 ^b	0.0022 ± 0.001 ^c	0.012 ± 0.003 ^{ab}
150 (T ₅)	3.823 ± 1.283 ^b	0.073 ± 0.011 ^c	0.174 ± 0.049 ^b	0.0033 ± 0.002 ^{ac}	0.016 ± 0.002 ^{ab}
300 (T _{CK})	1.973 ± 0.587 ^c	0.204 ± 0.036 ^a	0.188 ± 0.056 ^b	0.0030 ± 0.001 ^{bc}	0.024 ± 0.004 ^a
平均值 Mean	4.451 ± 1.442	0.096 ± 0.054	0.200 ± 0.039	0.0032 ± 0.0007	0.019 ± 0.009

同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

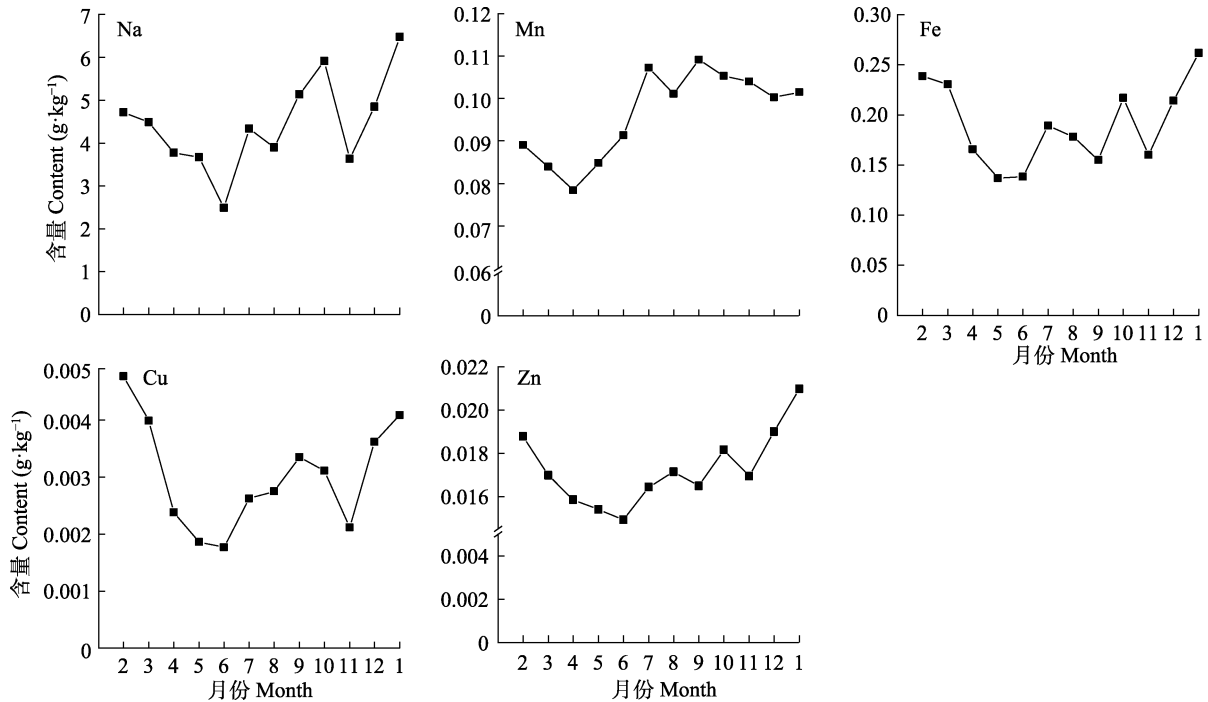


图1 木麻黄凋落叶金属元素含量月动态变化。

Fig. 1 Monthly dynamic changes of trace elements contents in litter of *Casuarina equisetifolia*.

Zn含量出现在6月(2.494 9、0.014 9 g·kg⁻¹)。Mn、Cu含量最大值分别出现于9、2月(0.109 1、0.004 8 g·kg⁻¹)，最小值出现于4、6月(0.078 4、0.001 7 g·kg⁻¹)。

2.2 不同海岸距离凋落叶金属元素养分归还量动态变化

由表3、表4可见，随着离海距离的增加，木麻黄凋落叶养分归还量存在一定的差异，并具有线性规律。Na归还量由T₁到T₂增加，T₂后逐渐下降，在T₁到T₃之间差异不显著，在T₄、T₅与T_{CK}之间存在极显著差异($p < 0.01$)。Mn与Cu，Fe与Zn归还量变化趋势具有一定的相似性，由基干林带向林内方向，前者表现为T₁到T₂增加，T₂到T₄逐渐降低，T₄后升高；后者表现为T₁到T₄逐渐降低，T₄后升高。Na、Cu归还量最大值出现于T₂，Fe、Zn出现于T₁，Mn出现于T_{CK}。

Na归还量最小值出现于T_{CK}，Fe、Mn出现于T₅，Cu、Zn出现于T₄。Mn归还量在T₁与T_{CK}间，Fe归还量在T₅与T₁、T₂间，Cu归还量在T₁与T₄间，Zn归还量在T₄、T₅与T_{CK}之间存在显著差异($p < 0.05$)，其他距离之间差异不显著($p > 0.05$)。Na、Fe、Zn归还量距离之间为一次线性函数，Mn、Cu归还量表现为二次线性函数。

不同海岸距离上木麻黄凋落叶金属元素归还量月动态变化具有一定的相似性，如图2所示。总体表现为2至5月逐月增加，6月存在低谷，8出现峰值，于12月出现低谷后升高。最低值均出现于2月，Na、Mn、Fe、Cu、Zn归还量分别为1.681 8、0.024 7、0.084 2、0.001 7、0.004 8 kg·hm⁻²。Na、Zn归还量最高值出现于5月(4.706 8、0.019 6 kg·hm⁻²)，Mn、Fe、Cu归还量最高值出现于8月(0.139 1、0.202 9、0.003 4 kg·hm⁻²)。

表3 不同海岸距离木麻黄凋落叶养分含量及归还量回归方程
Table 3 Equations for the calculation of litter element content and return of *Casuarina equisetifolia* at different distances to the coastline

元素 Element	含量 Content (g·kg ⁻¹)			归还量 Return amount (kg·hm ⁻²)		
	方程 Equation	R ²	p	方程 Equation	R ²	p
Na	y = -0.7365x + 7.0288	0.913 3	0.000	y = -8.978x + 73.306	0.897 3	0.000
Mn	y = 0.0112x ² - 0.0607x + 0.1395	0.689 4	0.000	y = 0.0889x ² - 0.4939x + 1.29	0.489 8	0.000
Fe	y = 0.009x ² - 0.0788x + 0.3393	0.977 3	0.019	y = -0.24x + 2.644	0.813 4	0.002
Cu	y = 0.002x ² - 0.0015x + 0.0056	0.780 3	0.022	y = 0.0012x ² - 0.0115x + 0.0505	0.776 0	0.054
Zn	y = 0.0013x ² - 0.0086x + 0.0276	0.833 1	0.019	y = -0.014x + 0.1962	0.664 8	0.009

y, 含量或归还量; x, 距离(m)。
y, content or return amount; x, distance to the coastline (m).

表4 不同海岸距离木麻黄凋落叶金属元素养分归还量(kg·hm⁻²)(平均值±标准偏差)
Table 4 The amount of nutrients returned from the litter of *Casuarina equisetifolia* at different distances to the coastline (kg·hm⁻²)(mean ± SD)

海岸距离 Coastal distance (m)	Na	Mn	Fe	Cu	Zn
30 (T ₁)	56.196 ± 19.596 ^a	0.636 ± 0.264 ^b	2.388 ± 1.008 ^a	0.037 ± 0.012 ^a	0.178 ± 0.048 ^{ab}
60 (T ₂)	59.136 ± 23.580 ^a	0.960 ± 0.264 ^{ab}	2.364 ± 0.924 ^a	0.038 ± 0.024 ^{ab}	0.176 ± 0.072 ^{ab}
90 (T ₃)	53.532 ± 17.136 ^a	0.876 ± 0.360 ^{ab}	1.848 ± 0.696 ^{ab}	0.026 ± 0.012 ^{ab}	0.174 ± 0.060 ^{ab}
120 (T ₄)	40.656 ± 21.816 ^{ac}	0.612 ± 0.252 ^{ab}	1.572 ± 0.756 ^{ab}	0.020 ± 0.012 ^b	0.110 ± 0.048 ^b
150 (T ₅)	25.896 ± 10.416 ^{bc}	0.528 ± 0.216 ^{ab}	1.176 ± 0.432 ^b	0.024 ± 0.012 ^{ab}	0.116 ± 0.048 ^b
300 (T _{CK})	15.864 ± 10.908 ^b	1.848 ± 1.512 ^a	1.476 ± 0.948 ^{ab}	0.026 ± 0.024 ^{ab}	0.128 ± 0.068 ^a
平均值 Mean	41.880 ± 17.733	0.910 ± 0.489	1.804 ± 0.492	0.029 ± 0.007	0.147 ± 0.032

同列不同小写字母表示差异显著(p < 0.05)。
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

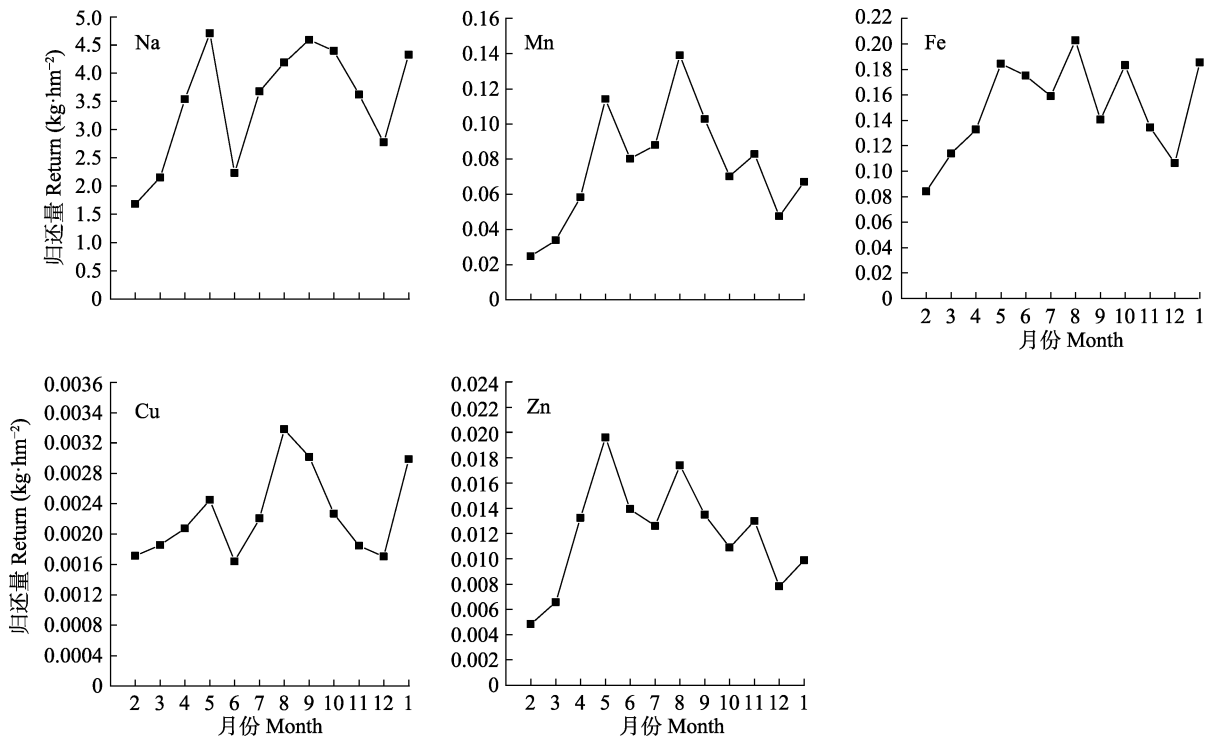


图2 木麻黄凋落叶金属元素养分归还量月动态变化。
Fig. 2 Monthly dynamics of nutrient return from litter of *Casuarina equisetifolia*.

2.3 不同海岸距离土壤金属元素含量

不同海岸距离上土壤金属元素含量存在差异, 如表5所示。随着离海距离的增加Na含量总体逐渐

降低, 距离间总体差异明显(F = 7.007, p < 0.05); Mn含量呈“V”形变化, 最低值位于T₃; Fe含量T₄ > T_{CK} > T₃ > T₅ > T₁ > T₂, Zn含量T_{CK} > T₄ > T₁ > T₅ >

表5 不同海岸距离土壤金属元素含量(平均值±标准偏差)

Table 5 Metal element content in soils at different distances to the coastline (mean ± SD)

海岸距离 Coastal distance (m)	Na (g·kg ⁻¹)	Mn (g·kg ⁻¹)	Fe (g·kg ⁻¹)	Cu (mg·kg ⁻¹)	Zn (mg·kg ⁻¹)
30 (T ₁)	4.305 ± 1.030 ^a	0.075 ± 0.019 ^{ab}	2.130 ± 0.212 ^a	0.9 ± 0.07 ^a	7.0 ± 0.69 ^{ab}
60 (T ₂)	3.554 ± 0.310 ^{ab}	0.074 ± 0.011 ^{ab}	2.063 ± 0.181 ^a	0.8 ± 0.08 ^{ab}	5.3 ± 1.08 ^a
90 (T ₃)	3.867 ± 0.844 ^{ab}	0.061 ± 0.013 ^a	2.299 ± 0.433 ^a	0.8 ± 0.07 ^{ab}	6.5 ± 1.66 ^{ab}
120 (T ₄)	3.106 ± 0.557 ^b	0.074 ± 0.077 ^{ab}	2.742 ± 0.220 ^a	0.6 ± 0.08 ^b	8.3 ± 1.16 ^b
150 (T ₅)	2.857 ± 0.186 ^b	0.082 ± 0.011 ^{ab}	2.196 ± 0.281 ^a	0.8 ± 0.16 ^{ab}	6.7 ± 1.28 ^{ab}
300 (T _{CK})	1.556 ± 0.399 ^c	0.090 ± 0.021 ^b	2.701 ± 0.790 ^a	0.7 ± 0.12 ^b	10.9 ± 2.47 ^c
平均值 Mean	3.208 ± 0.961	0.076 ± 0.010	2.283 ± 0.241	0.8 ± 0.09	7.5 ± 1.90

同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Different lowercase letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

表6 不同海岸距离木麻黄凋落叶金属元素含量之间及与土壤元素含量的Pearson相关分析($n = 12$)

Table 6 Pearson correlation analysis between the metal elements content in the litter of *Casuarina equisetifolia* at different distances to the coastline and soil elements content ($n = 12$)

	Na _L	Mn _L	Fe _L	Cu _L	Zn _L
Mn _L	0.426, 0.167 (ns)	1			
Fe _L	0.660, <0.05	0.117, 0.717 (ns)	1		
Cu _L	0.388, 0.213 (ns)	-0.034, 0.917 (ns)	0.724, <0.01	1	
Zn _L	0.825, <0.01	0.324, 0.304 (ns)	0.740, <0.01	0.550, 0.064 (ns)	1
pH	0.971, <0.05	0.777, 0.069 (ns)	0.695, 0.126 (ns)	0.613, 0.196 (ns)	0.617, 0.192 (ns)
	Na _S -Na _L	Mn _S -Mn _L	Fe _S -Fe _L	Cu _S -Cu _L	Zn _S -Zn _L
	0.987, <0.01	0.677, 0.140 (ns)	0.609, 0.200 (ns)	0.895, <0.05	0.769, 0.074 (ns)

表中数值为 r 和 p 值。Na_L、Mn_L、Fe_L、Cu_L、Zn_L分别表示凋落叶钠、锰、铁、铜和锌含量; Na_S、Mn_S、Fe_S、Cu_S、Zn_S分别表示土壤钠、锰、铁、铜和锌含量。ns, 不显著($p > 0.05$)。

Values in the table are r and p values. Na_L, Mn_L, Fe_L, Cu_L, Zn_L represent the sodium, manganese, iron, copper and zinc content of litter; Na_S, Mn_S, Fe_S, Cu_S, Zn_S represent the sodium, manganese, iron, copper and zinc content of soil. ns, not significant ($p > 0.05$).

T₃ > T₂, Fe含量距离间差异不显著, Zn含量距离间差异显著($F = 5.008$, $p < 0.05$); Cu含量T₁ > T₂ = T₃ = T₅ > T_{CK} > T₄, T₁与T₄、T_{CK}之间存在显著差异($p < 0.05$)。

2.4 木麻黄凋落叶金属元素之间及与土壤养分动态关系

通过对木麻黄凋落叶金属元素含量之间进行相关性分析发现, 凋落叶Mn和Cu含量之间为负相关关系; 其他元素之间均为正相关关系, 其中, Na-Fe存在显著正相关关系, Na-Zn、Fe-Cu、Fe-Zn存在极显著正相关关系。对凋落叶养分含量和土壤养分含量进行相关分析, 结果显示, 凋落叶与土壤相同元素之间均为正相关关系, 其中, Na和Cu达到显著水平; 土壤pH与凋落叶Na含量为显著正相关关系, 与Mn、Zn含量为负相关关系, 与Fe、Cu含量为正相关关系(表6)。

3 讨论

凋落叶养分含量在一定程度上反映植物的营养状况, 并受土壤性质、植物自身利用效率等方面的

影响(贾丙瑞, 2019)。本研究中, 木麻黄凋落叶金属元素含量高于吴锡麟等(2011)对赤山林场木麻黄衰老叶养分含量测定的值。这可能与土壤本底值以及金属元素富集作用有关(靳明华等, 2014)。Robert等(1996)、王瑾和黄建辉(2001)研究发现Mn、Fe、Cu和Zn在植物生长过程中存在富集现象。李晓刚等(2019)研究发现木麻黄对金属元素富集作用明显, 而含量的多少又受到林龄的影响, 靳明华等(2014)研究表明30年生木麻黄叶金属元素含量高于15年生, 本试验地木麻黄为27年生, 金属元素含量偏高。

不同海岸距离环境变化对木麻黄凋落叶金属元素含量均有显著影响, 但不同元素受影响程度有差异。随着离海距离的增加, Na含量逐渐降低; Fe、Cu和Zn含量在T₁到T₄逐渐降低, T₄后上升; Mn含量在T₁到T₂上升, 在T₂到T₄逐渐下降, T₄后上升。植物化学元素的含量与分布是植物长期演化的结果, 体现植物自身的特性, 受到植物所处生境的影响, 其中土壤本底值往往是一个重要因素(张志祥等, 2010)。本研究发现随着离海距离的增加, 土壤Na含量总体逐渐降低, Mn含量呈“V”形变化, Fe、Zn、Cu含量波

动变化; 总体来看, 不同距离之间Na、Zn含量差异性显著($p < 0.05$), Mn、Fe、Cu含量差异性不显著($p > 0.05$); 相关性分析发现凋落叶与土壤相同元素含量之间均为正相关关系, Na和Cu含量达到显著水平, 就元素含量变化趋势、差异性及相关性来看, 凋落叶Na含量受土壤本底值影响较大, Mn、Fe、Cu、Zn含量受其影响小。不同海岸距离环境变化最大因子为风力, 风影响叶凋落的时间, 进一步影响植物对衰老叶片养分的重吸收, 植物在叶片凋落前对其养分进行重吸收, 大部分移动性强的元素在叶片凋落前会转移到其他多年生器官中(张琳琳等, 2013; 申奥等, 2018)。由基干林带到林内过程中在林木的阻挡下, 风力存在差异使得叶片凋落的时间存在差异, 并对其养分含量产生影响。由T₁到T_{CK}受风力的影响逐渐降低(表1), 叶存留时间逐渐加长, 植物对衰老叶养分重吸收时间增加, 凋落叶养分含量逐渐降低。钟春柳等(2017)研究表明盐雾浓度对叶片的腐蚀作用同样会引起叶片提早凋落, 不同海岸距离的盐浓度同样存在差异, 因此凋落叶养分含量差异可能与空气中盐浓度存在密切关系, 盐浓度过高使得叶提早凋落, 重吸收时间缩短, 凋落叶片中元素转移不及时含量会增加。吴锡麟等(2011)研究表明木麻黄叶Na、Fe、Zn再吸收率在基干林带为负值, 而在林内部为正值, 同样说明不同海岸距离环境变化对植物养分特征产生一定的影响。对不同海岸距离木麻黄凋落叶元素含量进行线性分析得出Na为一次线性相关, 其他元素均为二次线性相关(表3), 远离海洋的对照组(T_{CK})元素含量与近海也存在明显差异, 因此不同海岸距离不同程度的环境胁迫会对凋落叶养分含量产生影响, 尤其是强风胁迫造成叶提早凋落、植株矮小等不同程度的伤害, 进一步影响养分循环。

凋落叶Na、Fe、Cu、Zn含量月动态变化具有相似性, 2至6月逐月下降, 6至10月波动上升, 11月出现低值; Mn含量在2至4月逐月下降后波动上升。叶功富等(2009)和Shukla等(2017)研究表明, 凋落物养分含量与气候有很大关系, 同时, 宁秋蕊等(2017)认为气温和降水量与叶片养分再吸收呈负相关关系。气候的变化与植物生长周期相对应, 2至6月气温逐渐升高, 植物进入了生长阶段, 对养分含量需求不断增加, 叶作为光合作用的场所, 是植物生命活动最为活跃的部位, 对于相关元素需求高, 例如Fe参

与叶绿素合成、Mn对维持叶绿体膜正常结构有重要作用(张正仁和宋长铨, 1991), 由于需求量增加, 叶在凋落前植物充分对养分进行重吸收, 使得凋落叶养分含量减少。6月进入夏季, 高温、强降雨、台风等极端天气多发, 会缩短叶凋落前的养分再吸收时间, 使得凋落叶养分含量升高; 秋冬植物生长减慢, 对养分需求量降低, 随着时间的推移, 凋落叶养分含量逐渐富集增加, 11月为初冬, 植物需一定的养分含量抵御寒冬, 对凋落叶养分进行再吸收(袁玉信, 1996)。

养分归还土壤作为森林自肥的重要机制, 影响着森林生态系统的养分循环, 凋落物养分归还量与凋落物量及其养分含量密切相关(阎恩荣等, 2008)。本研究中, 随着离海距离的增加凋落叶Na含量由T₁到T₂增加, T₂后逐渐下降; Mn与Cu, Fe与Zn含量变化趋势相似, 前者表现为T₁到T₂增加, T₂到T₄逐渐降低, T₄后升高; 后者表现为T₁到T₄逐渐降低, T₄后升高, 归还量变化趋势与含量变化有一定的相似性, 对不同海岸距离归还量进行线性回归分析, 结果呈现线性规律, Na、Fe、Zn为一次线性负相关(表3), 说明随着离海距离的增加归还量逐渐降低。养分归还量月动态总体表现为2至5月逐月增加, 6、12月存在低值, 8月出现峰值, 夏秋高于春冬。叶功富等(2009)研究发现凋落叶归还量与气温存在极显著正相关关系, 因此归还量变化受气温的影响, 气温影响植物的生长, 2到5月归还量与元素含量变化趋势相反可能与此有关, 植物生长加大对衰老叶养分的重吸收, 凋落叶养分含量减少, 但处于这个阶段的植物新陈代谢加快, 凋落叶量增加, 而凋落叶量对归还量贡献大(阎恩荣等, 2008)。谭芳林(2003)发现惠安赤湖国有防护林场木麻黄凋落物量, 2至6月总体呈上升趋势, 8、10月出现两个峰值, 10月至次年1月下降, 其变化趋势与本研究养分归还量有一定的相似性, 也说明凋落叶量对养分归还量贡献大。

植物叶内养分含量存在一定的相关性, 植物对元素吸收存在均衡性(Knecht & Göransson, 2004)。元素之间的拮抗与互促等不同的关系可能对凋落叶元素含量造成一定的影响(Marschner, 1986)。本研究得出Na-Fe存在显著正相关关系($p < 0.05$), Na-Zn、Fe-Cu、Fe-Zn存在极显著正相关关系($p < 0.01$), 说明元素之间存在协同作用; 多数研究发现Fe-Zn存在显著正相关关系(方运霆等, 2005; 钟志祥等,

2007), 本研究结果与此一致。Zn能够促进植物对其他元素吸收, 也是植物体内易被再分配和再利用的元素(张志祥等, 2010), Fe属于植物生长必不可少的元素, 但过量的Fe会产生毒害作用(Jugsujinda & Patrick, 1993), Fe-Zn存在极显著正相关关系说明木麻黄对Fe和Zn的吸收具有相似性; Na-Fe、Fe-Cu存在显著正相关说明适量的Fe能够促进植物对Na、Cu的吸收; 凋落叶中Zn和Na含量的相关性达极显著水平, 植株对这两种元素的吸收也具有相似性。其他元素之间相关性不显著, 这可能与元素含量有关, 元素含量相互之间的影响未达到显著水平。

综上所述, 不同海岸距离环境变化对木麻黄林内部的养分循环造成了显著的影响, 且随季节的变化存在不同程度波动, 元素间存在一定的相关性。沿海防护林虽然在防护宽度上并不是非常大, 但已在养分循环中呈现出明显的距离规律, 因此防护林经营应根据不同海岸距离以及季节采取相应的措施, 尤其要重视风力作用下植物内部养分循环的差异。此外, 本研究的距离宽度能够反映凋落物金属元素含量及归还量的变化规律, 但对于凋落物与活立木之间元素含量相关性以及与距离变化之间的关系仍需要深入研究。

参考文献

- Chapin III FS, Matson PA, Vitousek PM (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer, New York.
- Ebemer E (1876). *Die gesamte Lehre der Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaues. Unter Zugrundlegung der in den Königl. Staatsforsten Bayerns angestellten Untersuchungen*. Springer, Berlin.
- Fang YT, Mo JM, Zhou GY, Zhang DQ, Xue JH (2005). Minor nutrient element status of plant and soil in a lower subtropical evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Guihaia*, 25, 504–510. [方运霆, 莫江明, 周国逸, 张德强, 薛璟花 (2005). 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物和土壤微量元素含量. *广西植物*, 25, 504–510.]
- Jia BR (2019). Litter decomposition and its underlying mechanisms. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 648–657. [贾丙瑞 (2019). 凋落物分解及其影响机制. *植物生态学报*, 43, 648–657.]
- Jin MH, Ding ZH, Zhou HC, Ye GF (2014). Absorption and enrichment of heavy metals by *Casuarina equisetifolia* of different stand ages in a coastal zone. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 2183–2187. [靳明华, 丁振华, 周海超, 叶功富 (2014). 海岸带不同林龄木麻黄对重金属的吸收与富集作用. *生态学杂志*, 33, 2183–2187.]
- Jugsujinda A, Patrick Jr WH (1993). Evaluation of toxic conditions associated with orange symptoms of rice in a flooded Oxisol in Sumatra, Indonesia. *Plant and Soil*, 152, 237–243.
- Knecht MF, Göransson A (2004). Terrestrial plants require nutrients in similar proportions. *Tree Physiology*, 24, 447–460.
- Lado-Monserrat L, Lidón A, Bautista I (2016). Litterfall, litter decomposition and associated nutrient fluxes in *Pinus halepensis*: influence of tree removal intensity in a Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research*, 135, 203–214.
- Liu L, Zhao CM, Xu WT, Shen GZ, Xie ZQ (2019). Litter nutrient characteristics of mixed evergreen and deciduous broadleaved forests in Shennongjia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 7611–7620. [刘璐, 赵常明, 徐文婷, 申国珍, 谢宗强 (2019). 神农架常绿落叶阔叶混交林凋落物养分特征. *生态学报*, 39, 7611–7620.]
- Li XG, Kang XR, Cai ZY, Zhang HD, Zhang JF, He GP, Chen GC (2019). Heavy metal tolerance, accumulation and distribution in five clones of *Casuarina equisetifolia*. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 2094–2101. [李晓刚, 康希睿, 蔡泽宇, 张涵丹, 张建锋, 何贵平, 陈光才 (2019). 木麻黄对土壤重金属的生长响应及积累特征. *生态学杂志*, 38, 2094–2101.]
- Marschner H (1986). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
- Mo JM, Xue JH, Fang YT (2004). Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1413–1420. [莫江明, 薛璟花, 方运霆 (2004). 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对N沉降的响应. *生态学报*, 24, 1413–1420.]
- Ning QR, Li SZ, Jiang LC, Tao JJ, Chen HR, Liu C, Yang XY (2017). Characteristics and factors influencing foliar nutrient resorption in plants. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 23, 811–817. [宁秋蕊, 李守中, 姜良超, 陶晶晶, 陈涵睿, 刘聪, 杨贤宇 (2017). 植物叶片养分再吸收特征及其影响因子. *应用与环境生物学报*, 23, 811–817.]
- Peng SL, Liu Q (2002). The dynamics of forest litter and its responses to global warming. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1534–1544. [彭少麟, 刘强 (2002). 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 22, 1534–1544.]
- Pereira GHA, Jordao HCK, Silva VFV, Pereira MG (2016). Litter and nutrient flows in tropical upland forest flooded by a hydropower plant in the Amazonian basin. *Science of the Total Environment*, 572, 157–168.
- Robert B, Caritat A, Bertoni G, Vilar L, Molinas M (1996). Nutrient content and seasonal fluctuations in the leaf component of cork-oak (*Quercus suber* L.) litterfall. *Vegetatio*, 122, 29–35.

- Shen A, Zhu JJ, Yan T, Lu DL, Yang K (2018). Effects of leaf nutrient concentration and resorption on leaf falling time of dominant broad-leaved species in a montane region of eastern Liaoning Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 573–584. [申奥, 朱教君, 闫涛, 卢德亮, 杨凯 (2018). 辽东山区主要阔叶树种叶片养分含量和再吸收对落叶时间的影响. *植物生态学报*, 42, 573–584.]
- Shukla G, Pala NA, Chakravarty S (2017). Quantification of organic carbon and primary nutrients in litter and soil in a foothill forest plantation of eastern Himalaya. *Journal of Forestry Research*, 28, 1195–1202.
- Tan FL (2003). Study on litter decomposition and nutrient release in *Casuarina equisetifolia* protective plantation ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 39(Suppl. 1), 21–26. [谭芳林 (2003). 木麻黄防护林生态系统凋落物及养分释放研究. *林业科学*, 39(Suppl. 1), 21–26.]
- Wang J, Huang JH (2001). Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate zone of China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 25, 375–380. [王瑾, 黄建辉 (2001). 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较. *植物生态学报*, 25, 375–380.]
- Wu XL, Ye GF, Zhang SJ, Lin YM, Zhang LH (2011). Contents of some mineral elements and their resorption efficiencies in *Casuarina equisetifolia* branchlets across a coastal gradient. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 17, 645–650. [吴锡麟, 叶功富, 张尚炬, 林益明, 张立华 (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, 645–650.]
- Yan ER, Wang XH, Zhou W (2008). Characteristics of litterfall in relation to soil nutrients in mature and degraded evergreen broad-leaved forests of Tiantong, East China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 32, 1–12. [阎恩荣, 王希华, 周武 (2008). 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系. *植物生态学报*, 32, 1–12.]
- Ye GF, Zhang LH, Lin YM, Wang H, Zhou HC, Zeng Q (2009). Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus concentrations, and nutrient resorption efficiencies of *Casuarina equisetifolia* branchlets in Dongshan County, Fujian. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 6519–6526. [叶功富, 张立华, 林益明, 王亨, 周海超, 曾琦 (2009). 福建东山短枝木麻黄小枝氮磷含量及其再吸收率季节动态. *生态学报*, 29, 6519–6526.]
- Yuan YX (1996). The roles of microelements in plant life. *Bulletin of Biology*, 31, 4–8. [袁玉信 (1996). 微量元素在植物生活中的作用. *生物学通报*, 31, 4–8.]
- Zhang LL, Zhao XY, Yuan H (2013). Research progress on the effects of wind on plants and plant adaptation strategies. *Advance in Earth Science*, 28, 1349–1353. [张琳琳, 赵晓英, 原慧 (2013). 风对植物的作用及植物适应对策研究进展. *地球科学进展*, 28, 1349–1353.]
- Zhang YD, Liu YC, Gu FX, Guo MM, Miao N, Liu SR (2019). Litter composition and its dynamic in five main forest types in subalpine areas of west Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 502–508. [张远东, 刘彦春, 顾峰雪, 郭明明, 缪宁, 刘世荣 (2019). 川西亚高山五种主要森林类型凋落物组成及动态. *生态学报*, 39, 502–508.]
- Zhang ZR, Song CX (1991). The action of micronutrients played in plant life. *Journal of Nanjing University*, 27, 530–539. [张正仁, 宋长铨 (1991). 微量元素在植物生命活动中的作用. *南京大学学报*, 27, 530–539.]
- Zhang ZX, Liu P, Xu GD, Zhang JY, Li HJ, Liao JP, Wu SB (2010). Metal element contents of *Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis* in different community types and its relationship with soil nutrient factors in Eastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 505–516. [张志祥, 刘鹏, 徐根娣, 张家银, 李洪军, 廖进平, 巫松标 (2010). 不同群落类型下南方铁杉金属元素含量差异及其与土壤养分因子的关系. *植物生态学报*, 34, 505–516.]
- Zhong CL, Huang YX, Cao CF, Jiang C, Guo JL, Gu F (2017). Responses of element stoichiometry characteristics of *Casuarina equisetifolia* to distance from the coastline. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 12, 22–29. [钟春柳, 黄义雄, 曹春福, 姜超, 郭佳蕾, 古璠 (2017). 不同海岸梯度下木麻黄防护林生态化学计量特征. *亚热带资源与环境学报*, 12, 22–29.]
- Zhong ZX, Xu YP, Wan KY, Chen F (2007). Trace elements in leaves of 21 rare species of Magnoliaceae and Lauraceae in the *ex-situ* conservation site of Wuhan botanical garden and trace elements in soil. *Journal of Northeast Forestry University*, 35(3), 46–48. [钟志祥, 徐有明, 万开元, 陈防 (2007). 迁栖地樟科与木兰科21种珍稀植物叶片微量元素与土壤微量元素. *东北林业大学学报*, 35(3), 46–48.]

责任编辑: 程 磊 责任编辑: 李 敏