

不同距海处木麻黄分枝格局特征及冠形分析*

林勇明^{1,2} 俞伟¹ 刘奕¹ 闫淑君³ 洪伟^{1,2} 陈灿^{1,2} 李键^{1,2} 吴承祯^{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经营与过程重点实验室 福州 350002)

(³福建农林大学园林学院 福州 350002)

摘要 近海区域受持续性风力胁迫,防护林树种木麻黄在生长过程中树冠结构产生较大变化。为揭示木麻黄树冠结构对环境条件变化的可塑性响应特征,在福建省长乐市大鹤国有防护林场距海岸线450-500 m(样带1)、750-800 m(样带2)、1 050-1 100 m(样带3)设置3个距离梯度的样带,运用Strahler法研究木麻黄的分枝格局,并采用分形理论测定冠形的分形维数。结果表明:(1)在不同距海处木麻黄的分枝格局差异较大,距离海岸线越远,木麻黄各级枝条的分枝长度、总体分枝率、枝径比和逐步分枝率不断增大,但各级枝分枝角度表现出随机性分布的特征。(2)样带1树冠迎风面与背风面相比,分枝长度、枝径比_{2,1}和枝径比_{3,2}、分枝率均显著小于背风面,随着距海岸线距离的增加,差异性不断减弱。(3)在海风作用下,树木表现出对主干偏移形态响应,即距海岸线越近,主干偏移角越大。(4)木麻黄距海岸线越近,其树冠的分形维数越小,占据空间能力小,反之则占据空间能力大。因此,在沿海区域,木麻黄会通过冠形调整、减小分枝长度等方式以适应风力胁迫。图3 表4 参38

关键词 分枝格局;距离梯度;木麻黄;树冠形态;分形维数

CLC Q948.11 : S727.2

Characteristics of Branching Pattern and Crown Morphology of *Casuarina equisetifolia* L. in Different Coastal Distances*

LIN Yongming^{1,2}, YU Wei¹, LIU Yi¹, YAN Shujun³, HONG Wei^{1,2}, CHEN Can^{1,2}, LI Jian^{1,2} & WU Chengzhen^{1,2**}

(¹College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(²Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

(³College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract Due to continuous wind stress in coastal areas, *Casuarina equisetifolia* L., one of the species of coastwise protective shelterbelt, shows variety in crown architecture during its growth. To determine the adaptive morphological plasticity of crown architecture to different environmental conditions, we set up three belt transects at 450-500 (transect 1), 750-800 (transect 2) and 1 050-1 100 m (transect 3) from the coastline in *C. equisetifolia* protection forest in Dahe State-owned Forest Farm, Changle County, Fujian Province of China. In each belt transect, two 10 m × 50 m samples were used to survey the basic indices such as DBH, height, under branch height, crown breadth, deviation angle of stem, etc., and fractal dimensions of crown breadth were calculated. Furthermore, based on Strahler method, 7 trees were selected in each transect to survey the branch length, branch diameter and branch angle to horizon. The findings were as follows: (1) the bifurcation ratio, branch length and ratio of branch diameter of *C. equisetifolia* became greater with the increase of coastal distances except random branch angle to horizon. (2) the branch length, ratio of branch diameter and bifurcation ratio on the windward in transect 1 were significantly smaller than those on the leeward side. However, the trend weakened gradually with the increase of coastal distances. (3) With morphological response to wind, the stems of trees showed the highest deviation angle in transect 1, followed by transect 2 and 3. (4) Having higher capacity to occupy the space, fractal dimension of crown breadth in transect 3 is higher than the others. Our research showed that *C. equisetifolia* has adaptive responds to wind stress through crown adjustment, branching length decrease, etc. Fig 3, Tab 4, Ref 38

Keywords branching pattern; distance gradient; *Casuarina equisetifolia* L.; crown morphology; fractal dimension

CLC Q948.11 : S727.2

树木在生长过程中其构件发育模式表现出一定可塑性^[1-2],尤其是风、光、盐、水等胁迫因子对植物的形态特征有重塑作用,并影响植物的生态功能^[3-9]。分枝格局作为树冠构型

的基本特征之一,决定树种枝、叶、芽的配置模式,可以反映树种对空间、光等资源的利用特性及在环境条件差异下的适应策略^[10-12]。探讨分枝格局与环境变化的相互关系,一方面有助于了解种群的生活史生态对策,另一方面更能反映植物的表型可塑性,进而揭示植物发生过程与环境条件的关系,并为解释物种的适应与进化过程提供依据^[13-14]。我国学者对辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、太白红杉(*Larix chinensis*)、沙地云杉(*Picea mongolia*)、樟子松(*Pinus*

收稿日期 Received: 2012-08-12 接受日期 Accepted: 2012-10-10

*教育部博士点学科专项基金(20090315120008)和国家自然科学基金项目(31100303)资助 Supported by the National Ministry of Education Foundation for Ph.D Program (No. 20090315120008) and the National Natural Science Foundation of China (No. 31100303)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: fjwcz@126.com)

sylvestris)、黑松(*Pinus thunbergii*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)等树种构筑型进行了研究^[7, 13, 15-22], 积累了坚实的研究基础。树冠是叶片与枝条空间分布的集合体, 具有分形生长的特性, 冠幅的分形维数作为表征植物空间占据能力的有力工具, 能够真实反映树木生长的实际情况^[23-25]。

作为海岸主要的生态屏障, 沿海岸线向内陆延伸的沿海防护林, 成为抵御台风来袭、降低近海风速、维持滨海土壤、减轻国民财产损失的第一道防线, 并可改善滨海地区生态环境、促进区域生产发展。自上世纪60年代以来, 福建省从澳大利亚等地引入木麻黄, 并营造了超过2万hm²的木麻黄林, 发挥了防风固沙、增加木材和薪材资源及调节小气候的作用^[26]。由于沿海存在持续性风吹、水分补给波动、海水涨落引起土壤盐分变化等胁迫因素, 各种胁迫形式的单一或综合作用限制木麻黄的更新生长, 从而降低其防护效益。风力胁迫影响树木生长, 甚至引起植株大面积折断或连根拔起^[27], 在福建沿海因风吹作用, 植株适应持续性风力胁迫才能成长并发挥防护效益, 但目前对木麻黄的分枝格局及其冠形在风力胁迫下的响应特征研究较少。

我们以沿海木麻黄防护林为对象, 运用Strahler法和分形理论对不同距海处木麻黄分枝格局特征及冠形的分形维数进行研究, 分析在风力胁迫下木麻黄形态可塑性响应特征, 以期推动福建省沿海防护林体系建设与可持续经营, 为保护和维持海岸带环境质量与生态安全提供科学依据。

1 研究地概况

福建省长乐市大鹤国有防护林场位于福建省东部沿海、闽江口南岸, 东濒台湾海峡, 地理坐标为北纬25°40'~26°04', 东经119°24'~119°59', 紧邻福州市长乐国际机场, 其地势两面临山, 中间地带为开阔的鹤上平原, 属亚热带海洋性季风气候, 年均气温19.3℃, 年均降雨量1 383 mm, ≥10℃的积温6 375.6℃, 年实际日照时数1 837.6 h, 无霜期333 d, 空气相对湿度较大, 土壤主要为滨海沙壤。林场建有大面积的沿海防护林, 主要以木麻黄、湿地松(*Pinus elliottii*)、台湾相思(*Acacia confuse*)等树种为主要优势树种, 灌木层物种极少, 仅少量潺槁(*Litsea glutinosa*)、木豆(*Canajus cajan*)、牡荆(*Vitex negundo*)分布, 草本层主要有苍耳(*Xanthium sibiricum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、大蓟(*Cirsium japonicum*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

大鹤木麻黄防护林距海岸线约450 m向内陆延伸, 林带宽约1 km, 随着距海处的增大, 林内风速逐渐降低, 由4.13 m/s降至0.66 m/s。相应地木麻黄形态也不断发生变化。本研究为确定不同距海处的样地, 设置450-500 m、750-800 m、1 050-1 100 m 3个梯度, 在3个梯度内选择立地条件相似、冠形较一致的木麻黄林内各设置1个样带, 代表3个梯度基本状况。于2010年10月, 在每个样带内设置2个10 m × 50 m的样地(表1), 进行每木检尺, 调查样地内木麻黄的胸径、树高、枝下高、冠幅等指标, 并使用AVM-01手持式风速仪测定相对风

速。于10-11月在样地内选择相同年龄(约21年)的木麻黄典型植株各7株, 进行分枝格局各参数测定。

表1 不同距海处木麻黄样地基本概况

Table 1 Characteristics of *Casuarina equisetifolia* in different coastal distances

项目 Item	样带1 Transect 1 (450-500 m)	样带2 Transect 2 (750-800 m)	样带3 Transect 3 (1050-1100 m)
平均年龄 Average age (t/a)	21	21	21
平均胸径 Average DBH (D/cm)	20.03	21.14	23.44
平均树高 Average height (h/m)	10.97	13.02	13.59
平均枝下高 Average under branch height (h/m)	1.25	1.66	1.73
平均冠幅面积 Average layer crown (A/m ²)	9.32	11.26	12.58
相对风速 Relative wind speed	4.13	1.85	0.66

2.2 分枝格局与主干偏移角的测定

木麻黄叶片极度退化, 以绿色小枝为主要光合作用器官, 本研究为更好地反映木麻黄分枝格局特征, 采用Strahler法^[7, 28-29]来确定木麻黄的枝序, 即由外及内确定枝序, 将具光合能力的小枝视为叶部, 其着生的最外部枝条为第1级, 2个1级枝交会即为第2级, 2个2级枝交会后则为第3级, 依此类推, 如有不同枝级交会, 交会后则取较高的枝级作为枝级。

因在海岸带附近, 木麻黄植冠存在直迎风向的迎风面及背对风向的背风面, 在本研究中按背风面与迎风面划分对不同级别枝条的分枝参数进行测定与分析, 利用钢卷尺和直尺测定枝长、分枝数、枝间距等参数, 用圆规和半圆仪测定枝条上生长的小枝倾角、枝倾角等, 并利用随机枝取样法测定植株中、下层枝条的分枝数、枝长、枝径、枝间距等^[30]。

木麻黄主干在风力作用下会发生侧移的现象, 我们为测定其主干偏移角, 以竖直标杆为参照, 利用广角数码相机(尼康COOLPIX L100)置于三角架上拍摄不同距海处各木麻黄样株, 在3个样带内分别拍摄50株, 通过计算机处理得出其顶梢与水平标杆间的夹角, 即主干偏移角。

2.3 数据处理

植物具有分形生长特性, 对分形体的自相似性进行描述的主要工具是分形维数, 其包括信息维数、计盒维数及关联维数, 我们采用前人常用的计盒维数公式^[23]进行计算。计算如下:

$$N(L) = CL^D \quad (1)$$

分别以冠幅平均值、树冠面积和树冠体积3种计量方法测定分形维数, 其中 C 为比例系数(常量), L 取每一冠幅级的中值, $N(L)$ 取属于该冠幅级的株数出现频率的累加值, 并利用前人编写的改进单纯形法计算程序^[31-32]对(1)式直接进行参数估计, 以精确计算分形维数 D 。

同时, 运用枝径比、总体分枝率、逐步分枝率的计算公式^[10, 28]进行数据处理, 枝径比(RBD)计算公式如下:

$$RBD = D_{i+1}/D_i \quad (2)$$

式中, D_{i+1} 和 D_i 分别是第 $i+1$ 和 i 级枝条的直径。

分枝率计算则包括总体分枝率(OBR)和逐步分枝率(SBR), 其计算分别见公式(3)、(4)。

$$OBR = (N_T - N_S)/(N_T - N_I) \quad (3)$$

式中, $N_T = \sum N_i$, 表示所有枝级中枝条总数; N_s 为最高级枝条数; N_i 为第 i 级的总枝数。

$$SBR_{i+1} = N_i / N_{i+1} \tag{4}$$

式中, N_i 和 N_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 级的枝条总数。

对调查数据进行加权算术平均处理, 用SPSS软件进行单因素方差分析, 如果差异显著, 再进行Turkey HSD检验。

3 结果与分析

3.1 不同距海处木麻黄的枝系特征

不同距海处木麻黄枝系结构的各参数存在明显的差异(表2)。统计结果表明, 不同样带间木麻黄总体分枝率存在一定差异性, 其中样带3与样带1差异显著 ($P<0.05$), 样带2与样带3、样带1无显著差异; 逐步分枝率 $SBR_{1,2}$ 表现出相似的趋势; 逐步分枝率 $SBR_{2,3}$ 在3个样带间均存在显著差异。木麻黄在样带1到样带3, 各级枝长度随着与海岸线的距离增加而逐渐增大, 不同样带间枝条长度存在显著差异 ($P<0.05$), 总体趋势表现为样带3>样带2>样带1, 其中样带3的1级枝、2级枝、3级枝的分枝长度分别比样带1增加10.37、17.12和18.64 cm。不同样带木麻黄的枝径比 $RBD_{2,1}$ 、 $RBD_{3,2}$ 和同级分枝角度均无显著差异, 但枝径比有随着海岸线后退而逐渐增大的趋势, 各级枝条分枝角度表现出随机性, 呈现出水平向上与水平向下并存的生长特性。此外, 在同一样带内不同等级枝条的长度随着枝系等级增大而不断增加, 样带1至样带3的3级枝长度分别可达1级枝长度的2.32、2.14和2.13倍。以上分析表明, 木麻黄在不同距海处分枝长度、分枝率和枝径比都发生一定的变化, 反映木麻黄分枝格局对海岸线不同环境的响应特征, 即木麻黄距离海岸线越远, 其受抑制的条件越小, 枝系结构越优。

表2 木麻黄在不同距海处的分枝式样特征
Table 2 Branching characteristics of *C. equisetifolia* under different coastal distances

参数 Parameter	样带1 Transect 1 (450-500 m)	样带2 Transect 2 (750-800 m)	样带3 Transect 3 (1050-1100 m)
总体分枝率 Overall bifurcation ratio (OBR)	3.20±1.06 ^a	3.34±1.14 ^{ab}	3.56±1.28 ^b
逐步分枝率 Stepwise bifurcation ratio ($SBR_{1,2}$)	2.96±0.75 ^a	3.21±0.82 ^{ab}	3.41±1.03 ^b
逐步分枝率 Stepwise bifurcation ratio ($SBR_{2,3}$)	3.72±1.16 ^a	4.38±1.28 ^b	4.92±1.54 ^c
1级枝的长度 Length of 1st order branch (l/cm)	18.34±6.13 ^a	24.52±7.36 ^b	28.71±6.82 ^c
2级枝的长度 Length of 2nd order branch (l/cm)	27.16±5.46 ^a	36.73±6.25 ^b	44.28±7.94 ^c
3级枝的长度 Length of 3rd order branch (l/cm)	42.58±8.28 ^a	52.35±8.73 ^b	61.22±10.35 ^c
枝径比 _{2,1} Ratio of branch diameter ($RBD_{2,1}$)	1.76±0.46 ^a	1.84±0.38 ^a	1.92±0.42 ^a
枝径比 _{3,2} Ratio of branch diameter ($RBD_{3,2}$)	1.97±0.51 ^a	2.05±0.56 ^a	2.10±0.48 ^a
1级枝倾角 1st branch angle to horizon ($\alpha/^\circ$)	R (M-5.24)	R (M-2.16)	R (M-1.38)
2级枝倾角 2nd branch angle to horizon ($\alpha/^\circ$)	R (M-15.46)	R (M-11.65)	R (M-12.59)
3级枝倾角 3rd branch angle to horizon ($\alpha/^\circ$)	R (M5.62)	R (M4.34)	R (M6.13)

不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。R: 随机; M: 均值
Data with different letter means significant difference at 5% level. R: random; M: mean

3.2 不同方位木麻黄分枝格局的变化特征

不同距海处木麻黄分枝格局间存在一定的差异, 而在同一样带内不同方位间枝条的分枝格局也存在一定的差异, 主要体现在分枝长度、枝径比及分枝率上。

3.2.1 分枝长度的空间变化特征 分枝长度代表枝条的空间拓展能力及资源利用能力, 各级枝条长度间因环境条件不同会产生响应性的变化^[7]。由图1分析, 带1、带2、带3各级分枝长度均表现为在背风面较长, 迎风面较短。其中, 样带1的1级枝长度在迎风面仅为15.48 cm, 而在背风面长度为20.52 cm, 迎风面与背风面长度差为5.04 cm; 2级枝和3级枝长度在迎风面为24.29、36.35 cm, 背风面为30.16、46.13 cm, 差值分别为5.87和9.78 cm, 迎风面与背风面各级枝长度均存在显著差异。样带2背风面1级枝和2级枝长度显著长于其迎风面, 但3级枝长度不存在显著差异。样带3背风面各级枝条长度均比迎风面长, 但不存在显著差异。表明木麻黄因迎风面受风力直接影响, 其环境条件劣于背风面, 枝条长势较差。

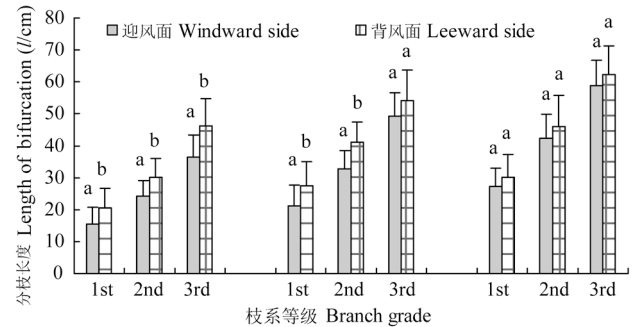


图1 不同距海处木麻黄不同方位的分枝长度
Fig. 1 Branching length of *C. equisetifolia* in different orientations in different coastal distances

图中从左向右依次为样带1、样带2、样带3。1st代表1级枝; 2nd代表2级枝; 3rd代表3级枝。不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同
From the left to the right are transects 1-3. 1st represents 1st order branch; 2nd represents 2nd order branch; 3rd represents 3rd order branch. Different letters above the bars indicate significant difference at 5% level. The same below

3.2.2 枝径比的空间变化特征 枝径比反映高一级枝条对低一级枝条的支撑能力, 对枝条的拓展、分布起着控制性作用, 也是衡量植物空间占据能力的指标之一。由图2分析可知, 样带1背风面的枝径比_{2,1}和枝径比_{3,2}的数值(1.87和2.16)均明显大于迎风面(1.56和1.82), 差值分别为0.31和0.34。样带2背风面的枝径比_{2,1}(1.98)与迎风面(1.72)存在显著差异, 而背风面的枝径比_{3,2}则略高于迎风面, 不存在显著差异。样带3背风面的枝径比_{2,1}和枝径比_{3,2}均与迎风面不存在显著差异。表明距离海岸线越近的木麻黄因受风力作用较大, 背风面与迎风面的枝径比产生差异, 但随着距海岸线的距离增大后风速降低, 木麻黄背风面与迎风面的枝径比差异就会逐渐减弱。

3.2.3 分枝率的空间变化特征 分枝率表示枝条产生分枝的能力以及各枝级间的数量配置状况^[16, 33]。由图3分析可知, 样带1木麻黄背风面的总体分枝率(OBR)、逐步分枝率($SBR_{1,2}$)、逐步分枝率($SBR_{2,3}$)(3.39、3.09、4.12)均显著大于迎风面(3.02、2.81、3.26)。样带2和样带3木麻黄背风面的总体分枝率(OBR)、逐步分枝率($SBR_{1,2}$)、逐步分枝率

(SBR_{2:3})与迎风面不存在显著差异,表明近海岸线木麻黄迎风面受风力影响显著,枝条分枝能力较背风面降低,但随着距海岸线距离的增加,迎风面与背风面的分枝能力差异性减弱。

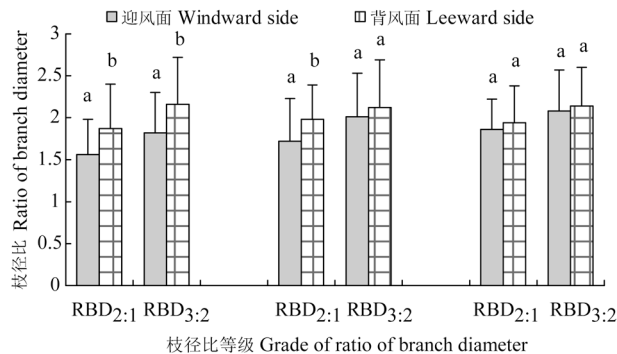


图2 不同距海处木麻黄不同方位的枝径比

Fig. 2 Ratios of branch diameter of *C. equisetifolia* in different orientations in different coastal distances

RBD_{2:1}代表枝径比(2:1), RBD_{3:2}代表枝径比(3:2)

RBD_{2:1} represents ratio of branch diameter (2:1), RBD_{3:2} represents ratio of branch diameter (3:2)

3.3 不同距海处木麻黄的主干偏移特征

树木正常生长时以直立向上为主要生长方式,在受强风、滑坡、倒木挤压、滚石冲击等作用下树木会发生倾斜,表现出对外界干扰的主干偏移形态响应特征。由表3分析可知,样带1、样带2、样带3的主干偏移角分别为10.27°、6.22°和3.58°,三者之间存在着显著差异。表明木麻黄在靠近海岸线时因持续性风吹影响,主干偏移程度明显,随着距海岸线越远,受木麻黄防护林的防护作用,风速降低,主干偏移角不断下降。

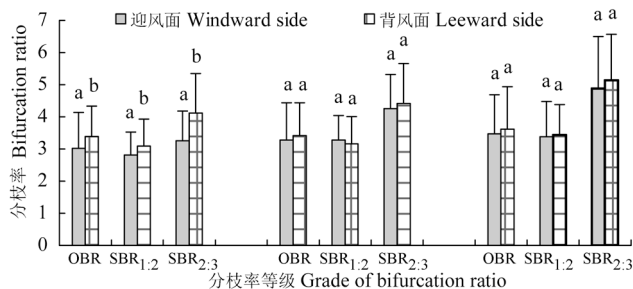


图3 不同距海处木麻黄不同方位的分枝率

Fig. 3 Bifurcation ratios of *C. equisetifolia* in different orientations in different coastal distances

OBR代表总体分枝率, SBR_{1:2}代表逐步分枝率(2:1), SBR_{2:3}代表逐步分枝率(2:3)
RBD_{2:1} represents ratio of branch diameter (2:1), RBD_{3:2} represents ratio of branch diameter (3:2)

3.4 不同距海处木麻黄树冠分形维数

冠幅的分形维数反映树冠的空间占据状态,其分形维数越高,表明树木向不同方向伸展得越充分,利用空间能力越强,占据空间的能力越大^[23]。由表4分析得出,3个样带的木麻黄虽然年龄相近,但树冠分形维数差异却较大,无论是冠幅平均值、树冠面积、树冠体积均表现出相同的趋势,即:样带3木麻黄的树冠分形维数>样带2木麻黄的树冠分形维数>样带1木麻黄的树冠分形维数。表明木麻黄距海岸线越近,其树冠的占据能力受风影响有所降低,随着距离增大,树冠

占据能力逐渐增加。

表3 不同距海处木麻黄的主干偏移角

Table 3 Deviation angle of the stem of *C. equisetifolia* in different coastal distances

距海处 Coastal distance	样带1 Transect 1 (450-500 m)	样带2 Transect 2 (750-800 m)	样带3 Transect 3 (1050-1100 m)
主干偏移角 Deviation angle of stem	10.27±2.61 ^a	6.22±1.39 ^b	3.58±1.11 ^c

不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Data with different letter means significant difference at 5% level

4 讨论

4.1 植物形态对风的可塑性响应

植物的构件具有可塑性,会随着环境的改变而采取一定的适应策略^[7, 20, 34]。在风力胁迫下,植物生长会出现矮化、畸形等^[3],使植物呈旗形状发育^[4],造成树冠冠型不对称,并导致枝条发生一定的偏转及构件生物量的空间分配^[35-37]。木麻黄受持续性风吹影响,近海岸线处的分枝长度、分枝率等显著降低,主干偏移角越大,冠形分形维数较小,尤其在迎风面时木麻黄分枝长度、分枝率、枝径比在越接近海岸线位置受风力影响越严重,显著小于背风面。因此,在风力作用下,植物会通过冠形调整(如加大主干偏移角、减小迎风向冠幅等)、减小分枝长度、降低分枝能力等方式来适应风力胁迫。

4.2 植物形态与防护功能的关系

沿海防护林植物的首要功能是为了防风固沙,主要通过防护林对风的阻挡作用,改变风向和降低风速,从而保护沿海土壤^[7]。植物形态完整性(包括伸展的树冠、固结性好的根系、抗压性好的主干等)决定其防护能力的大小。然而,在接近于海岸线时,第一道木麻黄林带受风力胁迫作用最大,其枝条长度及分枝能力受到抑制,树高出现矮化,主干偏移度加大,甚至易被强风连根拔起并最终死亡,因此随时间变化其防护能力较距海远的木麻黄将呈现出不断降低的趋势。同时,完整的植株还应包括地下的根系,由于树木的根系是评价植物体的固定作用和抗拉能力的重要指标^[38],其不仅为树木提供水分、养分,还起到维持树木向上生长、抵御外力对树木体的拉扯、推挤、抬起等作用,因此要全面评价木麻黄的形态特征与防护功能大小的关系,应进一步开展木麻黄根系构型及其功能的研究。

4.3 木麻黄经营与更新的启示

根据木麻黄分枝格局和冠形特征的分析,了解其在不同距海处的适应机制,考虑形态可塑性因素,对不同距海处木麻黄采取不同的经营与更新措施。样带1作为第一道防线,受风力胁迫作用最大,在需更新改良时,尽量避免间伐更新,应发挥原有林带对更新树种的防护作用,选择以小面积引种的沙柳、台湾相思等进行改良,形成乔木亚层及灌木层的群体效应,增强其防风固沙作用,当林带更新完全时再间伐老弱木麻黄。样带2受风力影响小于样带1,但其自疏能力较弱,枝下高较低,为1.66 m,应人为修枝增加其枝下高,加大林内透光度,并配置灌木和草本,增加乔木层下植被覆盖率。样带3木麻黄生长较样带1和样带2好,且林下木麻黄萌生幼苗较多,但其伴生树种和灌草本植物偏少,林下缺乏植被覆盖,应在引进乡土乔木、灌木与草本物种的基础上,促进其形成乔灌

表4 不同距海处木麻黄冠幅的分形维数
Table 4 Fractal dimensions of *C. equisetifolia*

统计指标 Statistic variable	距海处 Coastal distance	拟合方程 Regression equation	分形维数 Fractal dimension	相关系数 Related coefficient
冠幅平均值 Average layer crown	样带1 Transect 1 (450-500 m)	$N=16.5866L^{1.5527}$	1.5527	0.965
	样带2 Transect 2 (750-800 m)	$N=8.1068L^{1.6103}$	1.6103	0.949
	样带3 Transect 3 (1050-1100 m)	$N=2.3658L^{2.4420}$	2.4420	0.956
树冠面积 Crown area	样带1 Transect 1 (450-500 m)	$N=4.9948L^{1.3227}$	1.3227	0.964
	样带2 Transect 2 (750-800 m)	$N=1.7778L^{1.4665}$	1.4665	0.955
	样带3 Transect 3 (1050-1100 m)	$N=0.9670L^{2.0422}$	2.0422	0.967
树冠体积 Crown volume	样带1 Transect 1 (450-500 m)	$N=1.3019L^{1.2509}$	1.2509	0.974
	样带2 Transect 2 (750-800 m)	$N=0.3155L^{1.4152}$	1.4152	0.951
	样带3 Transect 3 (1050-1100 m)	$N=0.0146L^{2.1503}$	2.1503	0.959

草立体复层结构, 改良土壤性质, 增强土壤的抗侵蚀能力。

5 结论

(1) 木麻黄在不同距海处, 其分枝长度、分枝率、枝径比等表现出形态可塑性的特征。距离海岸线越远, 木麻黄各级枝条的分枝长度、总体分枝率、枝径比和逐步分枝率不断增大, 但各级枝分枝角度表现出随机性分布的特征。

(2) 因迎风面直接受海风影响, 造成木麻黄迎风面与背风面分枝格局的差异, 随着距海岸线越远, 差异性不断减弱。其中, 样带1迎风面的分枝长度(包括1级、2级、3级枝)、枝径比_{2,1}和枝径比_{3,2}、分枝率[包括总体分枝率(OBR)、逐步分枝率(SBR_{1,2})、逐步分枝率(SBR_{2,3})]均显著小于背风面。

(3) 在受强风作用下, 树木表现出对主干偏移形态响应。尤其在靠近海岸线时因持续性风吹影响, 主干偏移程度明显, 随着距海岸线越远, 风速降低, 主干偏移角下降。

(4) 木麻黄距海岸线越近, 其树冠的分形维数越小, 表明其空间占据能力降低, 随着距离增大, 其树冠的分形维数越大, 占据能力随之增加。

本研究仅探讨了木麻黄成树枝系与冠形特征, 而未涉及对不同发育阶段木麻黄的枝系与冠形适应对策的改变过程, 因此若要了解木麻黄在沿海区域整个生命史的形态适应对策, 还需进一步开展定位观测研究。

参考文献 [References]

- Halle F, Oldeman RAA. Essai sur l' Architecture et la Dynamique de la Croissance des Arbres Tropicaux [M]. Paris: Masson, 1970. 178
- Harper JL. The Conception of Population in Modular Organism [M]. Oxford: Blackwell, 1981. 53-77
- 于云江, 史培军, 鲁春霞, 刘家琼. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27 (1): 53-58 [Yu YJ, Shi PJ, Lu CX, Liu JQ. Response of the eco-physiological characteristics of some plants under blown sand [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2003, 27 (1): 53-58]
- 道本迈尔 R.F. 植物与环境[M]. 曲仲湘译. 北京: 科学出版社, 1986. 60-64
- Poulson TL, Platt WJ. Replacement patterns of beech and sugar maple in Warren Woods, Michigan [J]. *Ecology*, 1996, 77 (4): 1234-1253
- Gilmore DW, Seymour RS. Crown architecture of *Abies balsamea* from four canopy positions [J]. *Tree Physiol*, 1997, 17: 71-80
- 张丹, 李传荣, 许景伟, 刘立川, 周振, 王晓磊, 黄超. 沙质海岸黑松分枝格局特征及其抗风折能力分析[J]. 植物生态学报, 2011, 35 (9):

- 926-936 [Zhang D, Li CR, Xu JW, Liu LC, Zhou Z, Wang XL, Huang C. Branching pattern characteristics and anti-windbreakage ability of *Pinus thunbergii* in sandy coast [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, 35 (9): 926-936]
- 8 张川红, 沈应柏, 尹伟伦, 潘青华, 赵毓桂. 盐胁迫对几种苗木生长及光合作用的影响[J]. 林业科学, 2002, 38 (2): 27-31 [Zhang CH, Shen YB, Yin WL, Pan QH, Zhao YG. Effect on salt stress on photosynthesis and growth of four tree species seedlings [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, 38 (2): 27-31]
- 9 秦景, 董雯怡, 贺康宁, 陈静, 于洋, 王占林. 盐胁迫对沙棘幼苗生长与光合生理特征的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18 (3): 1031-1036 [Qin J, Dong WY, He KN, Chen J, Yu Y, Wang ZL. Effects of salt stress on growth and photosynthetic physiological features of *Hippophae rhamnoides* seedlings [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, 18 (3): 1031-1036]
- 10 Steingraeber DA. Phenotypic plasticity of branching pattern in sugar maple (*Acer saccharum*) [J]. *Am J Bot*, 1982, 69: 638-640
- 11 Koppers M. Ecological significance of aboveground architectural patterns in woody plants: a question of cost-benefit relationships [J]. *Trends Ecol Evol*, 1989, 4 (12): 375-379
- 12 Ohsawa N, Nitta I. Patterning of subtropical/warm-temperate evergreen broad-leaved forest in east Asian mountains with special reference to shoot phenology [J]. *Tropics*, 1997, 6 (4): 317-334
- 13 孙书存, 陈灵芝. 不同生境中辽东栎的构型差异[J]. 生态学报, 1999, 19 (3): 359-364 [Sun SC, Chen LZ. The architectural variation of *Quercus liaotungensis* in different habitats [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, 19 (3): 359-364]
- 14 李俊清, 臧润国, 蒋有绪. 欧洲水青冈(*Fagus sylvatica* L.)构型与形态多样性研究[J]. 生态学报, 2001, 21 (1): 151-155 [Li JQ, Zang RG, Jiang YX. Review on studies of architecture and morphological diversity for *Fagus sylvatica* L. [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, 21 (1): 151-155]
- 15 臧润国, 董大方, 李淑兰. 刺五加种群构件的数量统计(I)—刺五加种群地上部分构件的数量统计[J]. 吉林林学院学报, 1995, 11 (1): 6-11 [Zang RG, Dong DF, Li SL. Demography on the modules of *Acanthopanax senticosus* populations (I). Demography of the aboveground modules [J]. *J Jilin For Univ*, 1995, 11 (1): 6-11]
- 16 孙书存, 陈灵芝. 辽东栎植冠的构型分析[J]. 植物生态学报, 1999, 23 (5): 433-440 [Sun SC, Chen LZ. Architectural analysis of crown geometry in *Quercus liaotungensis* [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1999, 23 (5): 433-440]
- 17 邹春静, 韩士杰, 徐文铎. 沙地云杉构件动态与结构[J]. 武汉植物

- 学研究, 2001, **19** (5): 369-376 [Zhou CJ, Han SJ, Xu WD. Modular dynamics and structure of *Picea mongolica* [J]. *J Wuhan Bot Res*, 2001, **19** (5): 369-376]
- 18 徐程扬. 不同光环境下紫椴幼树植冠结构的可塑性响应[J]. 应用生态学报, 2001, **12** (3): 339-343 [Xu CY. Response of structural plasticity of *Tilia amurensis* sapling crowns to different light conditions [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12** (3): 339-343]
- 19 赵相健, 王孝安. 太白红杉分枝格局的可塑性研究[J]. 西北植物学报, 2005, **25** (1): 113-117 [Zhao XJ, Wang XA. Study on branching pattern plasticity of *Larix chinensis* [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2005, **25** (1): 113-117]
- 20 肖锐, 李凤日, 刘兆刚. 樟子松人工林分枝结构的分析[J]. 植物研究, 2006, **26** (4): 490-496 [Xiao R, Li FR, Liu ZG. Branching structure analysis of Mongolian pine plantation [J]. *Bull Bot Res*, 2006, **26** (4): 490-496]
- 21 刘兆刚, 舒扬, 李凤日. 樟子松人工林一级枝条基径和枝长模型的研究[J]. 植物研究, 2008, **28** (2): 235-241 [Liu ZG, Shu Y, Li FR. Modeling for primary branch length and branch diameter of Mongolian Scots pine trees [J]. *Bull Bot Res*, 2008, **28** (2): 235-241]
- 22 林勇明, 洪滔, 吴承祯, 洪伟, 胡喜生, 范海兰, 宋萍. 桂花植冠的枝系构型分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, **15** (4): 301-306 [Lin YM, Hong T, Wu CZ, Hong W, Hu XS, Fan HL, Song P. Architectural analysis of *Osmanthus fragrans* crown geometry [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2007, **15** (4): 301-306]
- 23 封磊, 洪伟, 吴承祯, 王新功, 程煜, 廖成章, 范海兰. 杉木人工林不同经营模式树冠的分形特征[J]. 应用与环境生物学报, 2003, **9** (5): 455-459 [Feng L, Hong W, Wu CZ, Wang XG, Cheng Y, Liao CZ, Fan HL. Fractal features of crown breath of different trees in different managements of Chines fir plantation [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2003, **9** (5): 455-459]
- 24 Zeide B, Pfeifer P. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns [J]. *For Sci*, 1997, **37** (5): 1253-1265
- 25 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, **9** (6): 651-657 [Li HB, Wang ZQ, Wang QC. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification [J]. *Chin Appl Ecol*, 1998, **9** (6): 651-657]
- 26 徐俊森, 罗美娟, 叶功富, 林武星, 许信玲. 木麻黄引种与福建省沿海防护林体系建设[J]. 防护林科技, 2001, **3**: 34-36
- 27 Sellier D, Fourcaud T. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds [J]. *Am J Bot*, 2009, **96**: 885-896
- 28 Whitney GG. The bifurcation ratio as an indicator of adaptive strategy in woody plant species [J]. *Bull Torrey Bot Club*, 1976, **103**: 67-72
- 29 Halle F, Oldeman RAA, Tomlinson PB. Tropical Trees and Forests, an Architecture Analysis [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 441-445
- 30 Maillette L. Structural dynamics of silver birch. I. The fates of buds [J]. *J Appl Ecol*, 1982, **19**: 203-218
- 31 吴承祯, 洪伟. 观光木群落物种多度分布的Weibull模型研究[J]. 福建林学院学报, 1997, **17** (1): 20-24 [Wu CZ, Hong W. Study on Weibull model for species abundance distribution *Tsoongiodendron odorum* forest [J]. *J Fujian Coll For*, 1997, **17** (1): 20-24]
- 32 吴承祯, 洪伟. 运用改进单纯形法拟合Logistic曲线的研究[J]. 生物数学学报, 1999, **14** (1): 117-121 [Wu CZ, Hong W. A study on optimum fitting for logistic curve by modified simplex model [J]. *Biol Methem*, 1999, **14** (1): 117-121]
- 33 陈波, 达良俊. 栲树不同生长发育阶段的枝系特征分析[J]. 武汉植物学研究, 2003, **21** (3): 226-231 [Chen B, Da LJ. Branching patterns of *Castanopsis fargesii* as affected by growth and developmental phases [J]. *J Wuhan Bot Res*, 2003, **21** (3): 226-231]
- 34 何亚平, 费世民, 徐嘉, 陈秀明, 蒋俊明, 涂代伦. 川西南山地云南松林窗边界木偏冠现象与影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2007, **29** (6): 66-71 [He YP, Fei SM, Xu J, Chen XM, Jiang JM, Tu DL. Crown inclination of *Pinus yunnanensis* gap border trees and the influencing factors in the mountain area of southwest of Sichuan, southwestern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2007, **29** (6): 66-71]
- 35 何明珠, 王辉, 张景光. 民勤荒漠植物枝系构型的分类研究[J]. 西北植物学报, 2005, **25** (1): 1827-1832 [He MZ, Wang H, Zhang JG. Classification of the branching architectures of the desert plants in Minqin County [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2005, **25** (1): 1827-1832]
- 36 Tarara JM, Ferguson JC, Hoheisel GA, Perez Peña JE. Asymmetrical canopy architecture due to prevailing wind direction and row orientation creates an imbalance in irradiance at the fruiting zone of grapevines [J]. *Agric For Meteorol*, 2005, **135**: 144-155
- 37 Ishii H, Asano S. The role of crown architecture, leaf phenology and photosynthetic activity in promoting complementary use of light among coexisting species in temperate forests [J]. *Ecol Res*, 2009, **25**: 715-722
- 38 Nicoll BC, Gardiner BA, Rayner B, Peace AJ. Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth [J]. *Can J For Res*, 2006, **36**: 1871-1883