

## 海南东寨港海桑 + 无瓣海桑红树林生态系统防风效应研究

楼坚<sup>1</sup>, 王旭<sup>1,2\*</sup>, 周光益<sup>3</sup>, 廖宝文<sup>3</sup> (1. 海南大学环境与植物保护学院, 海南儋州 571737; 2. 农业部儋州热带农业资源与生态环境重点野外观测试验站, 海南儋州 571737; 3. 中国林业科学院热带林业研究所, 广州龙洞 510520)

**摘要** [目的]研究海南东寨港海桑 + 无瓣海桑红树林生态系统防风效应。[方法]采用自动气象站对海南东寨港海桑 + 无瓣海桑典型人工红树林生态系统的防风效应进行定位观测。[结果]在 5 min 尺度上, 平均风速依次为: 林后 1H(H 为平均树高) < 林后 4H < 林前 1H < 林前 4H, 林后风速大幅度削减, 防风效果明显。旱季和雨季频率最高的风向分别是 NNE、NE, 林后 1H 对 NNE、NE 风的减弱程度较大, 分别为 34.70%、62.99%。林后 1H 处不同风速的减弱系数  $C_0$ 。雨季均远远大于旱季。旱季和雨季半小时平均风速进程均呈“单峰”变化, 白昼半小时平均风速远远大于夜晚, 白昼半小时平均风速变化急剧, 夜晚变化缓慢。5 min 风速尺度上, 林前 1H 风速与林前 4H 风速相关性最好。林前 1H 处与林后 1H 处风速正常情况下消减幅度为 65.35%~77.21%, 而热带风暴期间消减幅度为 33.29%~53.21%。[结论]为最合理的红树林造林结构和造林位置提供了理论支持和技术指导。

**关键词** 红树林; 风速; 减弱系数; 防风效能; 热带风暴

**中图分类号** S759.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)26-12776-06

### Effect of the Ecological System of Mangrove *S. caseolaris* and *Sonneratia apetala* on the Wind-prevention

LOU Jian et al (College of Environment and Plant Protection, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737)

**Abstract** [Objective] The effect of the ecological system of *Sonneratia apetala*-*S. caseolaris* at Dongzhai Harbor of Hainan Island on the wind-prevention was researched. [Method] The location observation of the effect of the typical artificial mangrove ecosystem on the wind-prevention was conducted with automatic weather station. [Results] The results showed that at the scale of 5min, the order of average wind speed was as follows: the back forest at 1H(H: the average tree height) < the back forest at 4H < the front forest at 1H < the front forest at 4H; and the wind speed was significantly reduced after its passing through the forest. The most frequency of wind direction in dry season is NNE while it was NE in rainy season. The reducing effects of the back forest at 1H for the NNE wind and NE wind reached a high level, with 34.70% and 62.99%, respectively. The  $C_0$ , the coefficient of wind speed-weakening, in the different wind speeds at the back forest at 1H in rainy season was much larger than in dry season. There was single peak in the wind speed of half hour in rainy season and the average wind speed and variation of half hour in day time was larger and heavier than in night time. At the scale of 5min, there was good relation in wind speed of the front forest between at 1H and 4H and the reduction of wind speed in the front forest and the back forest at 1H was 65.35%~77.21% in normal situation and 33.29%~53.21% in tropical storm time. [Conclusion] The theoretic supporting and technical guidance for the most optimal construction of the ecological system of mangrove forest and its location was provided.

**Key words** Mangroves; Wind speed; Coefficient of wind speed-weakening; Wind-prevention; Tropical storm

红树林(Mangrove forest)是生长在热带、亚热带低能海岸潮间带上部,受周期性潮水浸淹,以红树植物为主体的常绿灌木或乔木组成的潮滩湿地木本生物群落<sup>[1]</sup>。海洋沿岸红树林生态系统是沿海防护林的第一道屏障,近年来,由于红树林受到一定程度的破坏,沿海遭受到巨大的损失,尤其台风灾害,每年约有 10 次在中国沿海登陆,破坏性极强,造成巨大的人员伤亡和财产损失<sup>[2-3]</sup>。国外森林生态功能和生态效益方面的研究较早,并已形成较为完善的系统监测和研究网络,尤其是日、美、欧等西方发达国家在森林生态环境效益方面取得大量的成果<sup>[4-7]</sup>,但对于独特的红树林生态系统结构、功能定位监测及其效益计量研究比较少。早期,国外的研究(多为定性研究)初步指出红树林在消波防浪、减少潮汐危害和保护沿海海岸方面具有积极作用<sup>[8-9]</sup>,但红树林系统功能方面研究几乎一片空白。20 世纪 80 年代以来,随着经济的迅速发展、人口的不断增长和灾害的不断发生,在森林的环境效能和生态效益方面的研究取得了长足的发展<sup>[10-13]</sup>,国内逐步建立起了生态监测网络<sup>[14]</sup>,然而红树林生态系统的定位研究是个薄弱环节,防风效能方面的研究都是些短期(数天)或数次的观测数据<sup>[15-18]</sup>,防风效益的定量研

究更薄弱,其动态变化规律尚不清楚;对不同红树林结构(树种结构、林带结构)的减灾功能如何更是知之甚少;对红树林在防御或减轻自然和人为灾害的功能及其效益计量方面更是罕见报道。因此,针对沿海地区生态环境建设中这一十分重要和迫切需要解决的问题,笔者开展了红树林防风功能研究,以期探讨最合理的红树林造林结构和造林位置,为实现优化沿海防护林(尤其红树林)结构、功能,量化其效益的建设目标提供技术支持与决策参考。

### 1 材料与方法

**1.1 试验地概况** 试验地设在海南省海口市美兰区东寨港红树林保护区内,位于 110°36'E、19°55'N。试验地属滩涂淤泥,脚踩泥深度约 40 cm,潮汐属不正规半日潮,平均潮差约 1 m。该地属热带季风区海洋性气候,年平均气温 23.3~23.8℃,极端高温 38.9℃(7 月),极端低温 2.6℃(1 月),年降雨量 1 676.4 mm,年均相对湿度 85%。该区土壤基质为玄武岩,地带性土壤为砖红壤性红土,土层深厚,种植人工林的土壤为细粉砂质软泥,属滩涂淤泥,质地黏重,呈灰蓝色,并带有腥臭味,土壤有机质含量 25.38%,表土 pH 值 5.2,呈酸性反应,含盐量 17.97%<sup>[19]</sup>。

选取位于东寨港三江河闸门对出潮沟于 1997 年造的海桑 + 无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)人工林(以下称无瓣海桑林)作为研究林,距三江河闸门北面约 880 m,向西延伸长 100 m,林宽 30 m,株行距 2 m×4 m,海桑 + 无瓣海桑林群落结构见表 1。

**基金项目** 国家科技部社会公益专项(2005DIB3J137);“十一五”国家科技支撑计划专题(2006BAD03A1402);国家林业局“948”引进项目(2006-4-34);海南大学博士启动基金项目(Rndy0703)。

**作者简介** 楼坚(1987-),男,浙江诸暨人,本科生,专业:环境科学。\*通讯作者,博士,副教授,硕士生导师, E-mail: wxdick@scbg.ac.cn。

**收稿日期** 2009-05-25

表 1 海桑 - 无瓣海桑林群落结构

Table 1 The community structure of *Sonneratia caseolaris* L-*Sonneratia apetala* froest

层次 Layer	种群 Species	均高 $H_{avg}$ // m Average height	平均胸径 $DBH_{avg}$ // cm	频度 // % Frequency
乔木层 (>2.5 m) Arbor layer (>2.5 m)	无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	10.60	15.06	100.00
	海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i> L.	9.56	12.69	57.14
幼树层 ( $\leq 2.5$ m) Young trees layer ( $\leq 2.5$ m)	秋茄 <i>Kandelia candel</i>	1.44	2.56	100.00
	桐花 <i>Aegiceras corniculatum</i> L.	0.92	2.07	85.71
	海莲 <i>Bruguiera sexangula</i>	0.78	1.55	28.57
	老鼠勒 <i>Acanthus ilicifolius</i> L.	1.06	1.20	42.86
	无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	2.50	2.00	14.28

## 1.2 方法

**1.2.1 研究方法。**该研究使用的数据为 2007 年 7 月 26 日至 2008 年 3 月 8 日的观测数据。4 个测风气象站布设在海桑 + 无瓣海桑林带走向的中垂线上,在北面 2 m 高度 4H、1H 处(简称林前 4H、1H)和南面 2 m 高度 1H、4H 处(简称林后 1H、4H)<sup>[20]</sup>,其中 H 为树木平均高( $H = 10.23$  m)。该试验中采用的测风气象站为美国 ONSET 公司的 ONSET H21-002 测风气象站,每 5 min 自动记录一次数据(每 5 s 观测数据的平均值)。为了定量评价红树林的生态防风效能,以林前 4H 处的风速作为对照,采用以下公式<sup>[21]</sup>计算林前 1H 和林后 1H、4H 的风速减弱系数  $C_a$ :

$$C_a = (V_{xk} - V_x) / V_{xk} \times 100\%$$

式中,  $V_{xk}$  为林前 4H 处的风速;  $V_x$  中  $x = 1, 2, 3$ , 分别为林前 1H 和林后 1H、4H 的风速。

风速减弱系数值越大,表明海桑 + 无瓣海桑林生态防风

效能越好。

**1.2.2 数据分析方法。**数据统计分析采用国际通用统计分析软件 SPSS13.0。

## 2 结果与分析

**2.1 风速在小时间尺度上的变化** 由表 2~3 可知,各位置 5 min 平均风速和日均风速平均值大小依次均为:林后 1H < 林后 4H < 林前 1H < 林前 4H,林后 4H、1H 风速的平均值较林前 1H、4H 风速的平均值减弱系数为 59.66%;以林前 4H 为对照,林前 1H 和林后 1H、4H 处风速减弱系数分别为 6.42%、64.44%、57.47%;以林前 1H 为对照,林后 1H、4H 处风速减弱系数为 62.00%、54.56%;林后 4H 较林后 1H 风速减弱系数为 -19.60%,表明海桑 + 无瓣海桑林后风速大幅度削减,防风效果明显。变异系数大小依次均为:林前 4H < 林前 1H < 林后 4H < 林后 1H,林后的变异系数突然增加,表明林分结构对其影响很大。

表 2 5 min 风速的统计数据

Table 2 Statistical data of 5 min wind speed

位置 Location	平均值 Average value	最大值 // m/s Maximum value	最小值 // m/s Minimum value	标准差 // m/s Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
林前 4H(CK) Front forest 4 H	4.550	15.770	0	1.620	0.356
林前 1H Front forest 1 H	4.258	14.660	0	1.702	0.400
林后 1H Back forest 1 H	1.618	8.720	0	1.023	0.632
林后 4H Back forest 4 H	1.935	5.940	0	0.862	0.446

表 3 风速的日均值变化

Table 3 The daily wind speed

位置 Location	平均值 // m/s Average value	最大值 // m/s Maximum value	最小值 // m/s Minimum value	标准差 // m/s Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
林前 4H(CK) Front forest 4H	3.333	10.215	1.012	1.607	0.482
林前 1H Front forest 1H	3.064	7.011	0.770	1.622	0.529
林后 1H Back forest 1H	1.225	4.010	0.317	0.841	0.687
林后 4H Back forest 4H	1.342	2.964	0.461	0.731	0.545

**2.2 风速在月尺度上的变化** 由表 4 可知,各位置月均风速的平均值大小依次均为:林后 4H < 林后 1H < 林前 1H < 林前 4H;变异系数大小依次均为:林后 4H < 林前 4H < 林后 1H

< 林前 1H;表明靠近林子前后处变异系数较大,林子防风上具有一定的边缘效应。

表 4 风速的月均值变化

Table 4 The monthly changes of wind speed

位置 Location	平均值 // m/s Average value	最大值 // m/s Maximum value	最小值 // m/s Minimum value	标准差 // m/s Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
林前 4H(CK) Front forest 4 H	2.008	3.412	0.913	0.785	0.391
林前 1H Front forest 1 H	1.740	3.179	0.733	0.803	0.462
林后 1H Back forest 1 H	1.032	1.887	0.591	0.423	0.410
林后 4H Back forest 4 H	1.019	1.215	0.664	0.204	0.200

由图1可知,以林前4H为对照,林后1H、4H风速减弱系数远远大于林前1H,其月均值变化均大致呈单峰趋势,雨季变化较大而旱季(11、12、1、2月)后变化缓慢,达最大值的月份分别为12月(79.57%)和11月(66.13%);除8月外,林前1H风速减弱系数的月均值变化缓慢,呈缓平趋势,主要与林前4H相差3H,而且又没有海桑+无瓣海桑林的影响有关。林后4H相对于林后1H处出现了负值,表明风速加大。

**2.3 白昼和夜晚的风速变化** 由图2可知,旱季和雨季半小时平均风速进程均呈“单峰”变化,白昼半小时平均风速远大于夜晚,白昼半小时平均风速变化急剧,夜晚变化缓慢;旱季,白昼林前4H、林前1H、林后1H、林后4H半小时平均风速最大值分别出现在14:30、15:00、11:30、14:30;雨季,白昼林前4H、林前1H、林后1H、林后4H半小时平均风速最大值分别出现在14:00、11:00、12:30、11:00。雨季半小时平均风速较早季达到最大值的时间早,与辐射、蒸散有关。白昼半小时平均风速变化急剧与辐射有关。

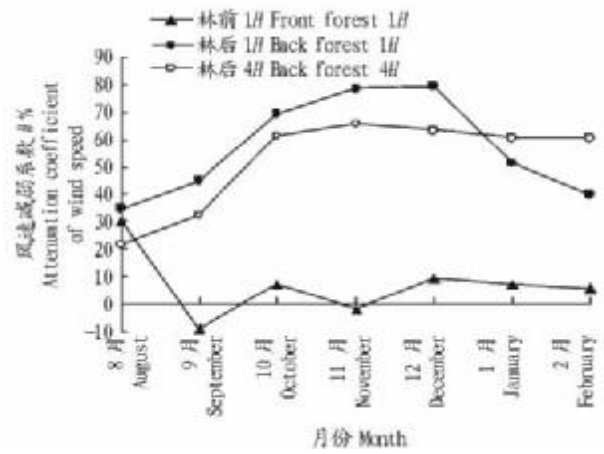
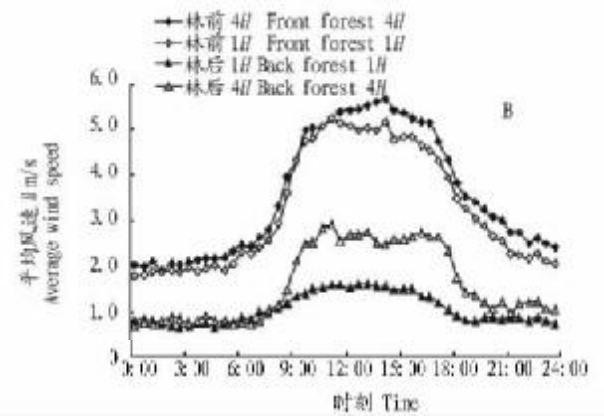
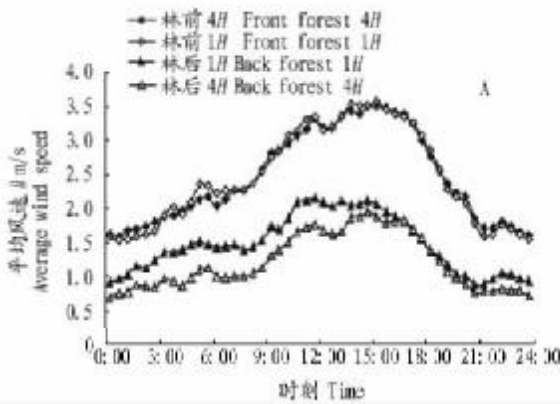


图1 风速减弱系数的月均值变化

Fig. 1 Average monthly changes of attenuation coefficient of wind speed



注:A为旱季;B为雨季。

Note:A. Dry season; B. Rainy season.

图2 白昼和夜晚半小时平均风速进程

Fig. 2 The average wind of half hour of daylight and night

**2.4 风在不同季节的变化**

**2.4.1 不同季节风向变化规律。**由于10月风速较大,当地的热带风暴又在10月左右盛行,因此,取10月作为雨季的代表月;由于1月风速较小,1月在11月至次年4月旱季范围的中间,因此,取1月作为旱季的代表月<sup>[22]</sup>。由于林后4H处数据不完整,因此取林前4H、林前1H、林后1H处数据作对比。由图3可知,海桑+无瓣海桑林前后雨季主导风向变化幅度(112.5°)大于旱季(90.0°);雨季,主导风向变化:林前4H处的ENE逆时针转化为林前1H处的NNE,再顺时针转化为林后1H处的E,而后林后4H处不变,仍然为E;旱季,主导风向变化:林前4H处的NE逆时针转化为林前1H处的N,再顺时针转变为林后1H处的NNE,而后顺时针转变为林后4H处的NE。

**2.4.2 不同季节同风向不同风速的减弱效应特征。**旱季和雨季发生频率最高的是NNE、NE 2种风,利用风速观测数据,以林前4H为对照,分别研究了旱季和雨季海桑+无瓣海桑林对以上2种风向不同风速的减弱效应特征(图4)。图中V1:2>V>0 m/s表示同一风向上林前1倍平均树高处和林后1倍平均树高处风速在0 m/s到2 m/s之间的平均风速减弱系数。其他类推。可以看出,林后1H处这2种风向不

同风速的减弱系数雨季均远远大于旱季。雨季,这2种风向的平均风速减弱系数随着风速的增大而减小,但当风速达到9 m/s时,平均风速减弱系数下降到最小值,以后随风速的增大变化呈平缓趋势;旱季这2种风向的平均风速减弱系数随着风速的增大而减小,并在风速处于3~4 m/s范围时出现最小值,在风速不超过7 m/s时变化呈平缓趋势,超过7 m/s后,随着风速的增大平均风速减弱系数又呈现缓慢上升趋势。

**2.5 各位置风速的相互关系** 由图5可知,对各位置5 min风速进行回归分析,林前1H与林后4H的相关性较好,其回归方程为:

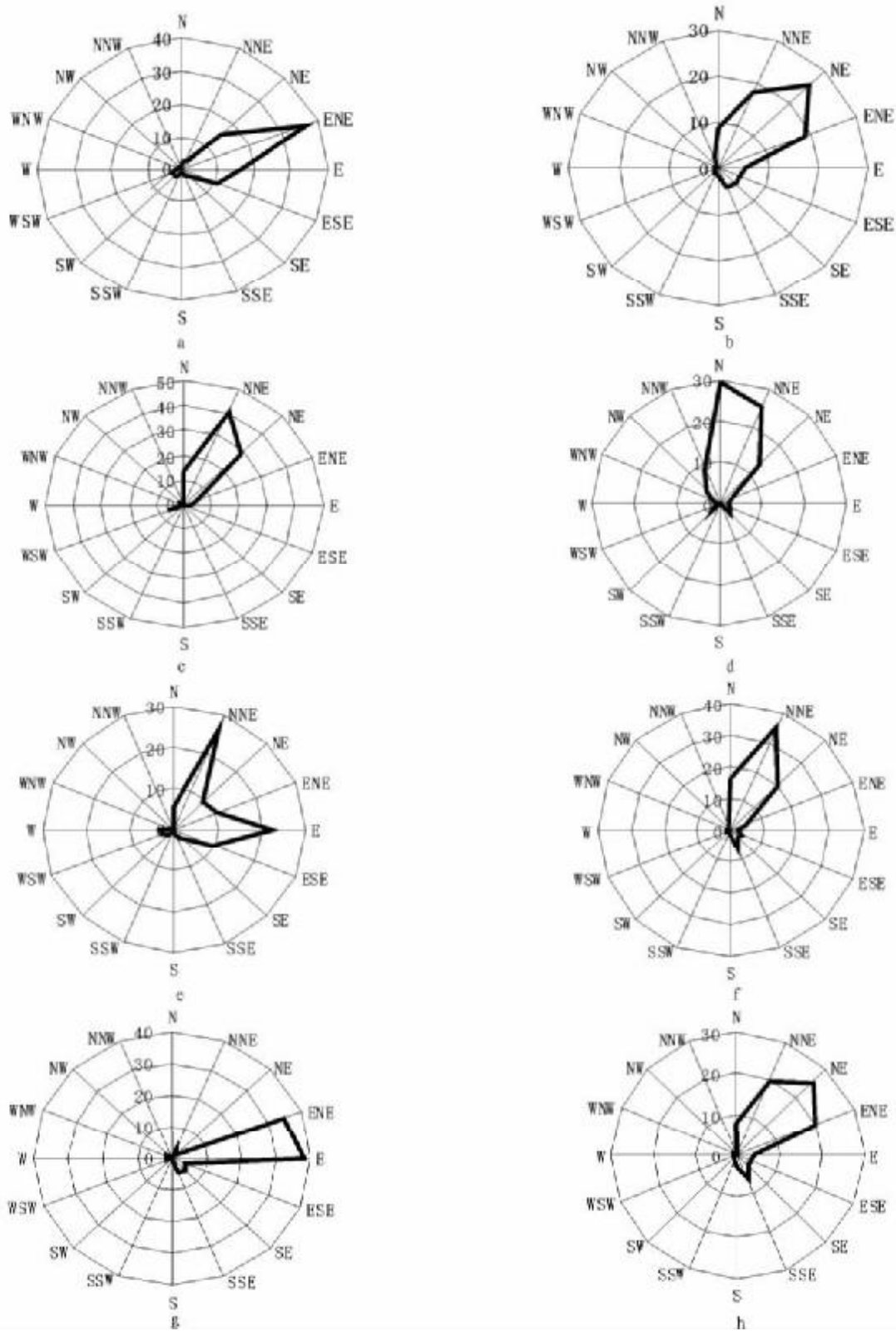
$$y = 1.001x - 0.2964 \quad (n = 6195, R^2 = 0.9076) \quad (1)$$

其他位置之间的相关性较差(R<sup>2</sup>的范围为0.0130~0.2068)。

由图6可知,各位置5 min风速减弱系数回归分析结果表明,林后4H相对林前1H减弱系数与林后1H相对林前1H减弱系数的相关性较好,其回归方程为:

$$y = 1.0835x - 14.9380 \quad (n = 6195, R^2 = 0.8349) \quad (2)$$

其他位置之间R<sup>2</sup>的范围为0.311~0.512。



注:a 为林前 4H 处雨季;b 为林前 4H 处旱季;c 为林前 1H 处雨季;d 为林前 1H 处旱季;e 为林后 1H 处雨季;f 为林后 1H 处旱季;g 为林后 4H 处雨季;h 为林后 4H 处旱季。

Note: a. Front forest 4H rainy season; b. Front forest 4H dry season; c. Front forest 1H rainy season; d. Front forest 1 H dry season; e. Back forest 1H rainy season; f. Back forest 1H dry season; g. Back forest 4H rainy season; h. Back forest 4H dry season.

图 3 各位置风向季节变化

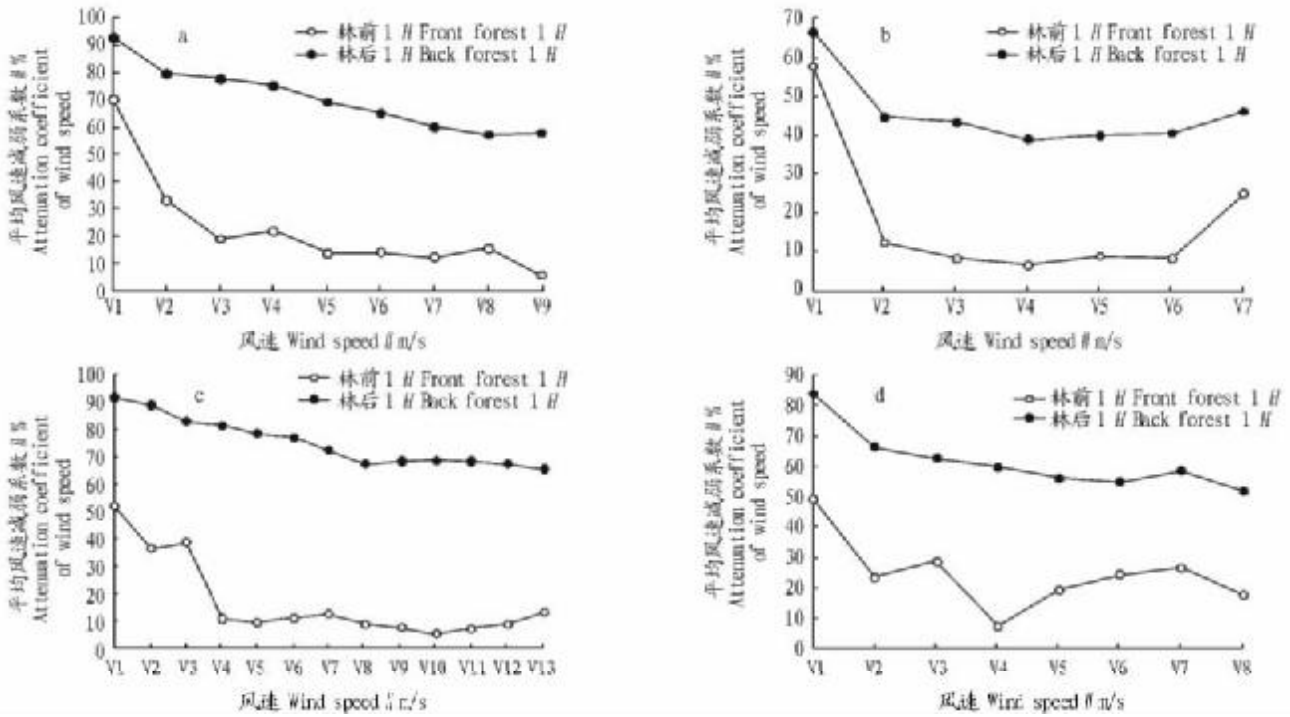
Fig.3 The Seasonal Changes of wind direction in every positions

**2.6 热带风暴期间风速的消减情况** 2007 年第 14 号热带风暴 (FRANCISCO) 于 9 月 24 日 6:00 ~ 7:00 经过试验群落区域 (途经 110°24' ~ 110°36'E, 19°48'N), 途经时风速 20 m/s (8 ~ 9 级风力)。

**2.6.1 风向的变化。**热带风暴期间 6:00 和 7:00 的风向变

化,林前 1H 处存在一个明显的主导风向为偏西北风 (NW), 主风向频率为 100%;林后 1H 处存在一个明显的主导风向为北风 (N), 主风向频率为 100%, 热带风暴的风向由林前 1H 的 NW 转化成林后 1H 的 N。

**2.6.2 风速的变化。**由图 7 可知,热带风暴期间 (24 日) 林



注:a 为雨季 NNE; b 为旱季 NNE; c 为雨季 NE; d 为旱季 NE。V1: 2 > V > 0 m/s; V2: 3 > V ≥ 2 m/s; V3: 4 > V ≥ 3 m/s; V4: 5 > V ≥ 4 m/s; V5: 6 > V ≥ 5 m/s; V6: 7 > V ≥ 6 m/s; V7: 8 > V ≥ 7 m/s; V8: 9 > V ≥ 8 m/s; V9: 10 > V ≥ 9 m/s; V10: 11 > V ≥ 10 m/s; V12: 13 > V ≥ 12 m/s; V13: 14 > V ≥ 13 m/s。

Note: a. Rainy season NNE; B. Dry season NNE; C. Rainy season NE; d. Dry season NE. V1: 2 > V > 0 m/s; V2: 3 > V ≥ 2 m/s; V3: 4 > V ≥ 3 m/s; V4: 5 > V ≥ 4 m/s; V5: 6 > V ≥ 5 m/s; V6: 7 > V ≥ 6 m/s; V7: 8 > V ≥ 7 m/s; V8: 9 > V ≥ 8 m/s; V9: 10 > V ≥ 9 m/s; V10: 11 > V ≥ 10 m/s; V12: 13 > V ≥ 12 m/s; V13: 14 > V ≥ 13 m/s。

图4 不同季节同一风向不同风速的减弱程度比较

Fig. 4 The decreased comparison of different wind speeds in the same wind direction of different seasons

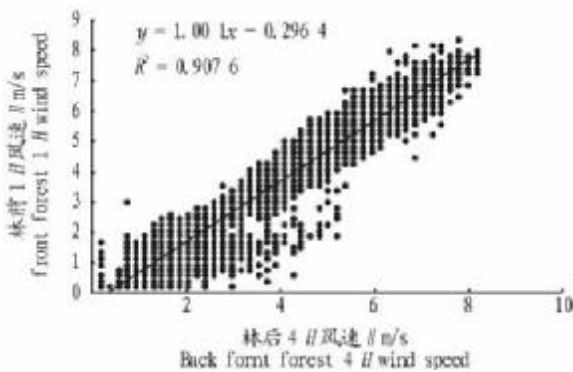


图5 林前1H与林后4H处5 min 风速的关系

Fig. 5 The relationship of five minutes wind speed between front forest 1H and back forest 4H

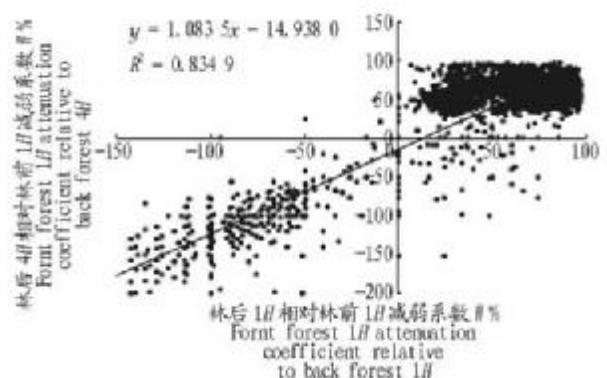


图6 林后4H与林后1H处5 min 风速减弱系数的关系

Fig. 6 The relationship of five minutes attenuation coefficient of wind speed between back forest 4H and back forest 1H

前1H 和林后1H 处风速变化呈“波浪线”形, 林前1H 处最大值(9.46 m/s)出现在7:56, 最小值(7.79 m/s)出现在6:11; 林后1H 处最大值(5.57 m/s)出现在7:46, 最小值(4.08 m/s)出现在6:01; 正常情况下(23日), 林前1H 风速变化呈“波浪线”形, 林后1H 处风速变化呈平缓的趋势, 林前1H 处最大值(4.82 m/s)出现在7:56, 最小值(3.34 m/s)出现在6:21; 林后1H 处最大值(5.57 m/s)出现在7:56, 最小值(0.93 m/s)出现在6:06。热带风暴期间林前和林后的风速均大于正常情况下, 正常情况下林前1H 处风速的平均值为热带风暴期间林后1H 的81.08%。

2.6.3 风速减弱系数的变化。由图8可知, 热带风暴期间(24日)的消减总量为95.02 m/s, 消减幅度为33.29% ~

53.21%, 7:46为最小, 6:06 达到最大; 正常情况(23日)的消减总量为66.84 m/s, 消减幅度为65.35% ~ 77.21%, 7:56为最小, 7:31 达到最大。

3 结论与讨论

3.1 红树林对风速的改变 在日尺度上, 各位置5 min 风速和日均风速的变化情况基本一致, 平均值大小依次均为: 林后1H < 林后4H < 林前1H < 林前4H, 表明海桑 + 无瓣海桑林后风速削减明显, 防风效果显著, 在月尺度上, 以林前4H 为对照, 林后1H、4H 风速减弱系数远远大于林前1H, 其月均值变化均呈单峰趋势, 达最大值的月份分别为12月(79.57%)和11月(66.13%); 除8月外, 林前1H 风速减弱

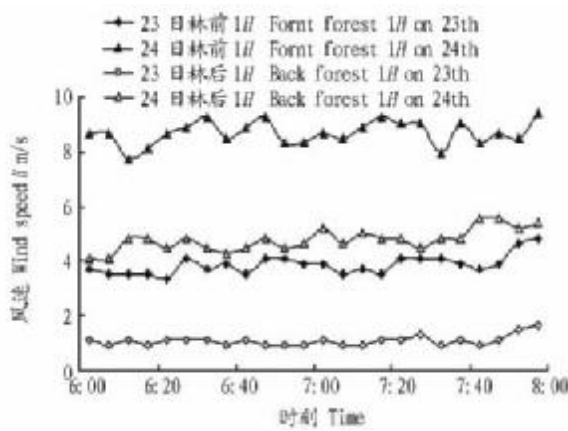


图 7 热带风暴期间风速的 6:00 和 7:00 进程

Fig. 7 The Process of wind speed 6:00 and 7:00 during tropical storms

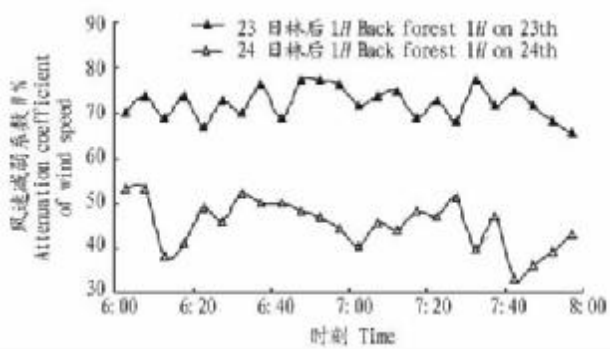


图 8 热带风暴期间风速减弱系数的变化

Fig. 8 The changes of attenuation coefficient of wind speed during tropical storms

系数的月均值变化缓慢,呈平缓趋势。

白昼和夜晚林后 4H 和 1H 的风速均远远小于林前 4H 和 1H;旱季,白昼和夜晚林后 4H 风速均小于林后 1H,各位置夜晚风速均小于白昼,雨季,白昼和夜晚林后 4H 风速均大于林后 1H,各位置夜晚风速均小于白昼,表明旱季有效防护距离长。

当气流到达林带边缘时,由于受林带的阻挡,气流大部或一部分抬升,在越过林带时在林带上方形成高速区,而在林带背风面,由于从林带上方越过的气流下沉或部分穿林而过的气流与越过林带正上方的气流相互作用而产生方向相反的涡旋,通过阻滞气流流动使得风速下降而在林后形成低速区,之后,风速逐渐恢复,距离林带愈远,速度恢复愈大<sup>[23-24]</sup>,这是林后 4H 处平均风速大于林后 1H 的主要原因。

潮水对红树林防风效应的影响较大且呈规律性变化,潮水高度不同造成林带平均疏透度不同,林带疏透度越小,林后沿来流风速衰减越快,能达到的最小速度值也越低,紧密结构的防护林沿来流风速衰减最快,但其风速恢复得也快,其防护距离最小,随着林带总平均疏透度的增加,防风效能显著增大<sup>[25]</sup>。红树林防风效应与潮水的具体关系有待进一步探讨。

**3.2 红树林对风向的改变** 林后 1H 对 NNE、NE 风的减弱程度较大,分别为 34.70%、62.99%。海桑+无瓣海桑林前后雨季主导风向变化幅度(112.5°)大于旱季(90.0°);雨季主导风向变化:林前 4H 处的 ENE 逆时针转化为林前 1H 处

的 NNE,再顺时针转化为林后 1H 处的 E,而后林后 4H 处不变仍然为 E;旱季主导风向变化:林前 4H 处的 NE 逆时针转化为林前 1H 处的 N,再顺时针转变为林后 1H 处的 NNE,而后顺时针转变为林后 4H 处的 NE。

林后 1H 对 N、NNE、NE、ENE、W、WNW、NW 风的减弱程度最大,对 SE、SSE、S、SSW、SW 风的减弱程度较小;林前 1H 对 N、ESE、SE、SSW、SW、WSW 风的减弱程度最大,对 ENE、WNW 风的减弱程度较小,各位置对不同风向的减弱程度明显不同。因此,在考虑东寨港盛行害风、风速特征、不同风向上的风速减弱程度的基础上<sup>[26-28]</sup>,应营造与 NNE、NE 相垂直的红树林防风林。

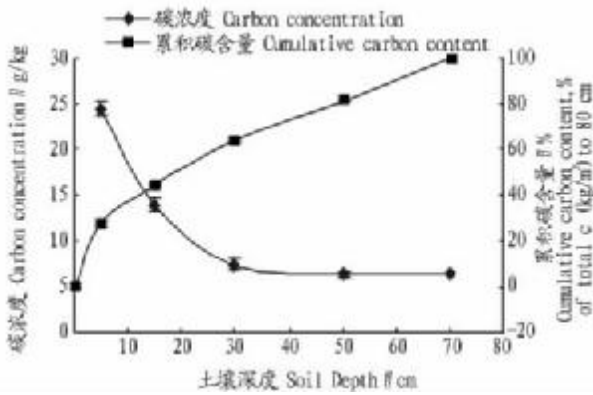
旱季和雨季发生频率最高的是 NNE、NE 风,林后 1H 处这 2 种风向不同风速的减弱系数雨季均远远大于旱季,这 2 种风向的平均风速减弱系数,雨季,开始随着风速的增大而减小,但当风速达到 9 m/s 后变化呈平缓趋势;旱季,开始随着风速的增大而减小,并在风速处于 3~4 m/s 时出现最小值,当风速超过 7 m/s 后变化呈现缓慢上升趋势;这与李锋瑞等的 4 月和 5 月杨树林发生频率最高的是 N、NNW、NW 风,这 3 种风向的平均风速减弱系数,4 月开始随风速的增大而增大,但当风速超过 10 m/s 后,才明显下降的研究结果不一样,主要原因是近地面的空气动力学粗糙度不同,由于杨树林是高大粗糙元,粗糙度较大,对风的阻滞力大<sup>[29]</sup>;杨树林的试验区位于科尔沁沙地奈曼旗境内(120°41'E,42°55'N;平均海拔 358 m),为典型温带半干旱大陆性季风气候,而红树林的试验区位于海口市美兰区东寨港,属热带季风区海洋性气候;在杨树林迎风区和背风区 6 倍树高处采用长春气象仪器研究所研制的风速梯度自动测定系统连续观测,数据采集频率为 1 min,在海桑-无瓣海桑林带走向的中垂线上,前后 1H、4H 上设 4 个美国 ONSET 公司的 ONSET H21-002 测风气象站,数据采集频率为 5 min<sup>[30]</sup>。

**3.3 热带风暴期间红树林的防风效应** 热带风暴期间风向由林前 1H 处的 NW 转变为林后 1H 处的 N。热带风暴期间林前和林后的风速均大于正常情况下,正常情况下林前 1H 处风速的平均值为热带风暴期间林后 1H 的 81.08%。热带风暴期间的消减总量为 95.02 m/s,减弱系数为 33.29%~53.21%;正常情况下的消减总量为 66.84 m/s,减弱系数为 65.35%~77.21%。此次热带风暴仅作为一个特例来探讨,不同等级的热带风暴和台风的风向风速减弱系数变化有待进一步专项研究。

#### 参考文献

- [1] 张齐民,张叶春. 华南红树林海岸生物地貌过程研究[J]. 第四纪研究, 1997(4):344-353.
- [2] 陈玉军,郑德璋,廖宝文. 台风对红树林损害及预防的研究[J]. 林业科学研究,2000,13(5):524-529.
- [3] CAHOON D R, HENSEL P, RYBCZYK J, et al. Mass tree mortality leads to mangrove peat collapse at Bay Islands, Honduras after Hurricane Mitch [J]. *Journal of Ecology*, 2003, 91(6):1093-1105.
- [4] IMBERT D, ROUSTEAU A, SCHERRER P. Ecology of mangrove growth and recovery in the lesser antilles; state of knowledge and basis for restoration projects [J]. *Restoration Ecology*, 2000, 8(3):230-236.
- [5] LOVELOCK C E, FELLER I C, MCKEE K L, et al. The effect of nutrient enrichment on growth, photosynthesis and hydraulic conductance of dwarf mangroves in Panamá [J]. *Functional Ecology*, 2004, 18(1):25-33.

(下转第 12784 页)



注:每个点代表着所有9个土壤剖面。  
 Note: Each points stands for 9 soil slopes.

图2 不同土壤深度碳浓度(g/kg)和各层累计碳储量

Fig.2 Carbon concentration (g/kg) and accumulative C content in different soil depths

2.3 不同演替阶段油松林土壤碳储量 各龄级油松人工林土壤碳储量见表2。12年的油松林土壤碳储量为10.12 kg/m<sup>2</sup>,20年油松林土壤碳储量为9.51 kg/m<sup>2</sup>,32年油松林碳储量为7.79 kg/m<sup>2</sup>。说明天然林砍伐后,种植油松,会导致土壤碳储量降低。在0~20 cm土壤表层,12和20年的油松林土壤有机碳储量显著高于33年的油松林,20~40 cm土壤层也有相似的格局。但各油松林40~60 cm,60~80 cm深

表2 各龄级油松人工林不同深度碳储量(±SD)。

Table 2 Soil OC content (kg m<sup>-2</sup>) of different depths in three types *Pinus tabulaeformis* plantations

年份 Year	土壤深度 Soil depth				总计 Total
	0~20cm	20~40cm	40~60cm	60~80cm	
12年	4.61 (0.42) a	1.85 (0.27) cd	1.75 (0.15)	1.91 (0.22)	10.12
20年	3.82 (0.11) ab	2.18 (0.13) c	1.80 (0.20)	1.71 (0.14)	9.51
32年	3.49 (0.16) b	1.56 (0.02) d	1.30 (0.09)	1.44 (0.05)	7.79

注:同列数字后相同字母或不带字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著。  
 Note: The same line after the numbers or with no letters stands for difference not significant; different letters stands for difference significant.

层土壤有机碳储量差异不显著。如果从不同深度土壤碳储量看,0~20 cm土层碳储量显著高于其它各层(P<0.05),其余各层间碳储量差异不显著(P>0.05),且这种趋势在不同年龄的油松林中表现一致。

3 结论与讨论

子午林天然次生林砍伐种植油松后开始次生演替,油松人工林地表腐殖质每年以1190.5g/(m<sup>2</sup>·a)的速率增长,其原因是随着油松林龄的增加,向地表输入的枯枝落叶量可能有所增加,另一方面,随林龄的增加地表凋落物的C/N比显著增高,即地表凋落物的分解速率在显著降低,这也是老油松林地地表凋落物现存量高的原因之一。油松林演替尽管地表凋落物现存量高,但由于这些凋落物很难分解,实际上进入土壤的可能并不多,另外,该群落中灌木和草本覆盖度小,地下根系更新量可能并不大。这些都会影响到土壤中有有机物质的数量,进而影响土壤有机碳含量。因此,子午林天然次生林砍伐仅种植单一品种的针叶植物会导致土壤碳储量下降。表明在进行森林恢复过程中,需注意针叶、阔叶树种(或者乔灌木)的搭配以及针叶树种对其它树种的排斥。

参考文献

[1] 侯庆春, 韩蕊莲, 李宏平. 关于黄土丘陵典型地区植被建设中有关问题的研究 I: 土壤水分状况及植被建设区划[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 102-110.  
 [2] 吴敬孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1998:16.  
 [3] LAL R, FAUSEY N R, ECKERT D J. Land use and soil management effects on the emissions of radiatively active gases from two soils in Ohio [M]//LAL R, KIMBLE J, LEVINE E. Soil management and greenhouse effect. Boca Raton: CRC Press, 1995:41-59  
 [4] LAL R, KIMBLE J, FOLLETT R. Land use and soil C pools in terrestrial ecosystems[M]//LAL R, KIMBLE G M, FOLLETT R F. Management of carbon sequestration in soil. Boca Raton: CRC Press, 1997:1-10.  
 [5] WALI M K. Ecological succession and the rehabilitation of disturbed terrestrial ecosystems[J]. Plant and Soil, 1999, 213: 195-220.  
 [6] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区2000年植被的变化发展[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 1-8.  
 [7] 刘东生. 黄河中游黄土[M]. 北京: 科学出版社, 1964:128, 146-149.  
 [8] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区自然环境及其演变[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

(上接第12781页)

[6] MEADES L, RODGERSON L, YORK A, et al. Assessment of the diversity and abundance of terrestrial mangrove arthropods in southern New South Wales, Australia[J]. Austral Ecology, 2002, 27(4): 451-458.  
 [7] ELLISON A M, MUKHERJEE B B, KARIM A. Testing patterns of zonation in mangroves: scale dependence and environmental correlates in the Sundarbans of Bangladesh[J]. Journal of Ecology, 2000, 88(5): 813-824.  
 [8] MCKEE K L. Root proliferation in decaying roots and old root channels: a nutrient conservation mechanism in oligotrophic mangrove forests[J]. Journal of Ecology, 2001, 89(5): 876-887.  
 [9] VERHEYDEN A, HELLE G, SCHLESER G H, et al. Annual cyclicality in high-resolution stable carbon and oxygen isotope ratios in the wood of the mangrove tree *Rhizophora mucronata* [J]. Plant, Cell and Environment, 2004, 27(12): 1525-1536.  
 [10] OTHMAN M A. Value of mangroves in coast protection [J]. Hydrobiologia, 1994, 285(1/3): 277-282.  
 [11] 章家昌. 防波林的消波性能[J]. 水利学报, 1966(2): 49-52.  
 [12] 张乔民, 温孝胜, 宋朝景, 等. 红树林滩涂沉积速率测量与研究[J]. 热带海洋, 1996, 11(4): 57-62.  
 [13] 王伯荪, 廖宝文, 王勇军, 等. 深圳湾红树林生态系统及其持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 89-120.  
 [14] 赵学敏. 湿地: 人与自然和谐共生的家园[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 75-93.  
 [15] 雷瑞德. 中国森林生态系统定位研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994: 110-125.  
 [16] 郑德璋, 廖宝文, 郑松发, 等. 红树林主要树种造林与经营技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 63-89.

[17] 张乔民. 红树林防风护岸机理与效益评价[C]//第七届全国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 1993: 853-861.  
 [18] 张乔民, 于红兵, 陈欣树, 等. 红树林海岸潮汐动力学的初步研究[C]//梁士楚. 中国红树林研究与管理. 北京: 科学出版社, 1995: 813-820.  
 [19] 李玫, 廖宝文, 郑松发. 无瓣海桑海滩人工林的生态影响[J]. 上海环境科学, 2003, 22(8): 540-543.  
 [20] 朱廷耀, 关德新, 吴家兵, 等. 论林带防风效应结构参数及其应用[J]. 林业科学, 2004, 40(4): 9-14.  
 [21] 李锋瑞, 张华, 赵丽娅, 等. 科尔沁沙地人工杨树林生态防风效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 62-66.  
 [22] 鹿世璋. 华南气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 275-283.  
 [23] 吕美仲, 侯志明, 周毅. 动力气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 87-92.  
 [24] 杨婷婷, 柴会强, 姚国征, 等. 乌兰布和沙漠绿洲农田防护林防风阻沙效益研究[J]. 林业资源管理, 2006(6): 42-45.  
 [25] 张乔民, 于红兵, 陈欣树, 等. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 258-265.  
 [26] 王志列, 许以平. 台风[M]. 北京: 气象出版社, 1983: 54-78.  
 [27] R. A. 安赛斯. 热带气旋的发展、结构和影响[M]. 北京: 气象出版社, 1984: 21-74, 113-145.  
 [28] 王鼎祥. 西行台风和海南岛的台风灾害[J]. 热带地理, 1985, 5(3): 141-148.  
 [29] 王汉杰, 王信理. 生态边界层原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 83-87.  
 [30] 张霞琛. 现代气象观测[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000: 99-114.