

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2020.40506

马志婷, 周璋, 李意德, 陈德祥, 赵厚本, 骆土寿, 许涵, 陈洁, 吴建辉, 张霞. 广州典型风水林碳密度特征[J]. 植物科学学报, 2020, 38(4): 506-516

Ma ZT, Zhou Z, Li YD, Chen DX, Zhao HB, Luo TS, Xu H, Chen J, Wu JH, Zhang X. Carbon density in geomantic forests in Guangzhou, China[J]. Plant Science Journal, 2020, 38(4): 506-516

## 广州典型风水林碳密度特征

马志婷<sup>1,2</sup>, 周璋<sup>1\*</sup>, 李意德<sup>1</sup>, 陈德祥<sup>1</sup>, 赵厚本<sup>1</sup>, 骆土寿<sup>1</sup>, 许涵<sup>1</sup>,  
陈洁<sup>1</sup>, 吴建辉<sup>1</sup>, 张霞<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 广州 510520; 2. 南京林业大学, 南京 210037)

**摘要:**以广州市典型风水林为对象, 对其生态系统全组分碳储量及其分配格局进行调查和估算, 研究碳密度特征及其影响因素。结果显示: 风水林生态系统平均碳密度为  $(259.17 \pm 69.67) \text{ t/hm}^2$ , 其中, 植被碳密度为  $(194.04 \pm 54.07) \text{ t/hm}^2$  (占 74.9%) (其中以乔木层占绝对优势, 达 90% 以上), 土壤碳密度为  $(65.13 \pm 19.30) \text{ t/hm}^2$  (占 25.1%); 植被和土壤碳密度之间呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 不同优势种类的风水林碳密度差异较大, 以米槠 (*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata.) 为优势的林分碳密度最大 ( $310.57 \pm 62.65 \text{ t/hm}^2$ )。结果表明影响风水林碳密度的主要因子是林分胸高断面积、林分密度、土壤容重和土壤碳含量, 其中, 风水林碳密度与胸高断面积、土壤容重和土壤碳含量呈显著正相关, 与林分密度呈显著负相关, 与植物多样性无显著相关。研究结果对南亚热带林分改造和碳汇林营造具有重要科学意义。

**关键词:** 风水林; 碳密度; 林分结构; 物种多样性; 土壤碳

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2020)04-0506-11

## Carbon density in geomantic forests in Guangzhou, China

Ma Zhi-Ting<sup>1,2</sup>, Zhou Zhang<sup>1\*</sup>, Li Yi-De<sup>1</sup>, Chen De-Xiang<sup>1</sup>, Zhao Hou-Ben<sup>1</sup>, Luo Tu-Shou<sup>1</sup>,  
Xu Han<sup>1</sup>, Chen Jie<sup>1</sup>, Wu Jian-Hui<sup>1</sup>, Zhang Xia<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Jianfengling Long-term Research Station for Tropical Forest Ecosystem, Guangzhou 510520, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Typical geomantic forests were studied in Guangzhou, and their carbon (C) density composition and distribution patterns were investigated. Ecosystem, vegetation, and soil C density were  $(259.17 \pm 69.67) \text{ t/hm}^2$ ,  $(194.04 \pm 54.07) \text{ t/hm}^2$ , and  $(65.13 \pm 19.30) \text{ t/hm}^2$ , respectively. The C densities of different dominant species in the geomantic forests differed significantly, with the highest C density for *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata. ( $310.57 \pm 62.65 \text{ t/hm}^2$ ). The ecosystem C storage was dominated by the tree layer (more than 90% of the vegetation). The main factors that affected forest vegetation C density in the geomantic forest were mean tree diameter at breast height (DBH), stand basal area (BA), stand density, soil bulk density, and soil C content, but not the species diversity indices. These results confirmed the importance of stand structure on C storage and dynamic reallocation in geomantic forests. Therefore, improving the complexity of community structure in geomantic

收稿日期: 2019-11-14, 退修日期: 2019-12-27。

基金项目: 广州市森林碳汇计量与监测研究项目(穗林园科信[2016]-06号); 广东省林业科技创新项目(2020KJCX006)。

This work was supported by grants from the Key Project of the Bureau of Forestry and Landscaping of Guangzhou and Forestry of Science and Technique Foundation of Guangdong Province (2020KJCX006).

作者简介: 马志婷(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学(E-mail: ioztm\_22@126.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: zhouzhang315@126.com)。

forests during forest management might enhance forest C storage.

**Key words:** Geomantic forest; Carbon storage density; Stand structure; Species diversity; Soil carbon

森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 占陆地生态系统有机碳的40%左右<sup>[1-3]</sup>, 存储了全球陆地植被碳库总量的82%~86%和土壤碳库总量的70%~73%<sup>[4, 5]</sup>, 在全球生态系统碳循环中起着重要作用。亚热带森林, 尤其东亚地区的亚热带森林(20°N~40°N), 其生态系统平均净生产力高于温带、热带森林以及同纬度的欧洲、非洲和北美洲, 具有较强的碳吸收能力<sup>[6]</sup>。因此, 研究亚热带森林碳密度具有重要的意义。

陆地生态系统碳存储能力受多个因子及其相互作用的影响, 森林生态系统主要通过光合作用、呼吸作用等来获得或释放碳, 森林碳密度的增加与否依赖于这些过程的平衡, 因此, 森林碳存储能力取决于这些过程对环境变化的敏感性和受环境的影响程度<sup>[7]</sup>。森林生态系统碳密度在区域和全球尺度上有明显的分布格局, 导致这种分布格局的因子主要受气候、土壤、地形和生物因子的影响。徐耀粘等<sup>[8]</sup>对影响森林生态系统碳密度的因子进行了归纳, 地上部分生物量最大值出现在降水丰富、气候较稳定(短暂或者没有旱季)并且大树较多的区域, 这也是导致热带和部分亚热带地区生物量最大的原因。由于不同地区物种组成、林分结构以及演替阶段等存在差异, 受各因子的影响程度不同, 得出的结果也不同<sup>[9]</sup>, 因此, 对小区域影响碳密度的因子进行分析更能反映地区或者林分间碳密度差异的主要原因。

风水林(Geomantic forest)作为我国南亚热带区域保存较好的常绿阔叶林, 演替时间较长, 能长期适应本土的自然生态环境, 群落结构较稳定, 是极具南方地域特色的植被景观与物种储存库, 也是最接近地带性植被特性的一种群落类型<sup>[10]</sup>。受不同地区森林文化的影响, 风水林的自然特性、结构特点和优势种群差异很大<sup>[11]</sup>。以往的研究主要集中于风水林的村落文化、保护和发展规划、风水林的物种组成、区系特征、物种多样性以及种群分布格局等群落特征(占研究总数的78.2%)和景观价值(5.5%)等方面的研究<sup>[12]</sup>, 而对风水林碳密度和影响因子研究很少<sup>[13-16]</sup>, 不能反映风水林的碳汇

功能特征。本研究选取广州市典型的风水林为对象, 通过研究其生态系统碳密度特征, 以期评估风水林生态服务功能价值、营建高效碳汇林等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究地区位于广州市(22°26'~23°56'N, 112°51'~114°03'E), 该区域属南亚热带海洋性季风气候, 年均温度22℃, 年均降水量1800~2200 mm<sup>[17]</sup>。地带性植被类型为南亚热带季风常绿阔叶林, 地带性土壤类型为砖红壤。选择的风水林样地分别位于广州市风水林分布最多、保存较好的从化、增城和黄埔, 代表种类有木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、黄桐(*Endospermum chinense* Benth.)、锥栗(*Castanopsis chinensis* Hance)、米槠(*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata.)、罗浮栲(*Castanopsis faberi* Hance)等, 均为我国南亚热带常绿阔叶林主要建群种<sup>[18]</sup>。

### 1.2 样地设置和调查

2015年8-9月, 在广州市设置15个风水林样地, 并开展群落结构、生物量和土壤调查, 采集植物和土壤碳含量样品。每个样地面积为40 m × 30 m, 对样地内植被(乔木层、灌木层和草本层)、细根、凋落物和土壤的碳密度(t/hm<sup>2</sup>)分别进行调查、取样和估算。风水林样地分布见图1, 样地信息见表1。

#### 1.2.1 植被层调查

将每个样地划分为12个10 m × 10 m的样方, 进行每木检尺。乔木起测胸径为3.0 cm, 测量和记录指标包括: 物种名、胸径、树高、冠幅、枝下高和存活状态等。

在每个样地内沿对角线设置3个2 m × 2 m的灌木调查样方, 记录株高1.5 m以上、胸径小于3.0 cm的乔木幼树和灌木的物种名、株(丛)数、平均基径和平均高度, 并在每个灌木样方内再设置1 m × 1 m的草本样方1个, 记录草本物种和株高

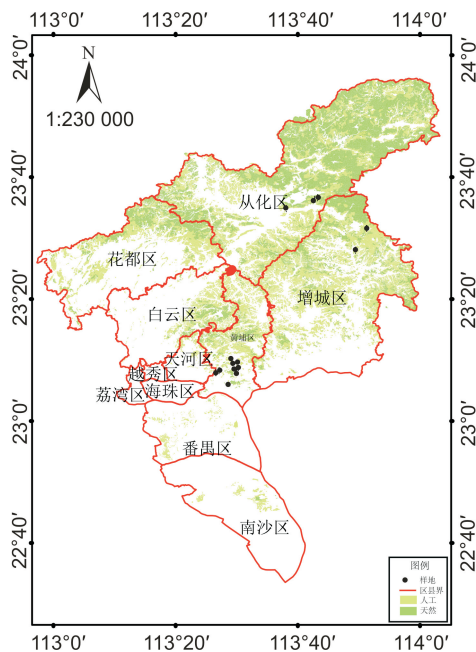


图 1 广州风水林样地分布图

Fig. 1 Samples of geomantic forest in Guangzhou

1.3 m 以下的乔灌木幼苗种名、平均盖度、株(丛)数和平均高度, 在草本样方中进行地表凋落物调查。灌木、草本、凋落物样方调查完后, 采用全收割法测量其鲜重, 并取样带回室内测定干重。细根( $\leq 2\text{ mm}$ )调查采用土钻法, 采用内径 5.5 cm 的土钻, 在每个样地内采集 8 钻土混合, 收集 0~20、20~40 cm 深土层的细根。乔木层生物量采用南亚热带常绿阔叶林已有经验公式计算<sup>[19, 20]</sup>, 每个样地每株乔木依据其胸径大小选取相应胸径范围的公式计算干、枝、叶、根生物量, 所有乔木累加即得到整个样地的生物量。灌木层、草本层、凋落物层的生物量, 根据样方测得的鲜重乘以干重率, 再除以样方面积得出。细根生物量, 根据每个样地收集的细根干重除以土钻面积得出。植被生物量为所有植被层(乔木层、灌木层、草本层、凋落物层、细根)生物量之和, 植被碳储量采用实测含碳率乘以生物量得到, 未实测碳含量的偶见种则采用平均碳含量(0.45)。

1.2.2 土壤层调查

采用挖剖面 and 土钻法相结合的方法, 在样地内分别采集 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 深共 5 个土层的土壤。样品采集 2 份, 1 份用环刀法采集用于土壤容重测定<sup>[21]</sup>, 另 1 份用于土壤碳、氮含量测定。土壤碳、氮含量(全碳、

全氮)利用“燃烧-气相色谱”元素分析仪测定(德国 Elementar 公司的 varioMacro cube 系统)。土壤碳密度根据实验室分析得到的各采样土层(0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm)的碳含量、土壤容重及石砾含量进行计算。

1.3 数据统计分析方法

- (1) 碳密度 = 碳储量/样地面积( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。
- (2) 物种多样性: 物种丰富度指一个群落中存在的总物种数; Simpson 物种多样性指数  $D = 1 - \sum P_i^2$ ; Shannon-Wiener 物种多样性指数  $S_w = -\sum P_i \ln P_i$ ; Pielou 均匀度指数  $J_{sw} = S_w / \log_2 S_0$ 。式中,  $P_i$  为物种  $i$  的重要值占总重要值的比率<sup>[22]</sup>。
- (3) 数据分析: 运用 Excel 进行基础数据整理, 运用 R 语言进行数据分析和绘图, 主要数据分析方法为方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 生态系统碳密度分配特征

风水林生态系统碳密度分配特征显示(表 2), 15 个风水林样地的生态系统碳密度平均值为  $(259.17 \pm 69.67) \text{ t}/\text{hm}^2$ , 变动范围为  $138.00 \sim 392.78 \text{ t}/\text{hm}^2$ ; 最小值和最大值分别出现在以木荷和米槿为主的风水林, 均值分别为  $(155.34 \pm 19.57) \text{ t}/\text{hm}^2$  和  $(310.57 \pm 62.65) \text{ t}/\text{hm}^2$ 。总体来看, 植被层碳密度为  $104.15 \sim 308.43 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 均值为  $194.04 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 占整个生态系统碳密度的  $67.40\% \sim 80.96\%$ ; 土壤层碳密度为  $33.85 \sim 93.67 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 均值为  $65.13 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 占整个生态系统碳密度的  $19.04\% \sim 32.60\%$ ; 植被层碳密度与土壤层碳密度最大、最小值的比值分别为 4.25 和 2.07, 二者呈显著正相关( $R^2 = 0.56, P < 0.001$ )(图 2)。

2.2 植被层碳密度分配特征

乔木层、灌木层、草本层、凋落物层、细根所占植被碳密度的比值分别为  $90.94\% \sim 98.88\%$ 、 $0.31\% \sim 5.07\%$ 、 $0 \sim 2.53\%$ 、 $0.38\% \sim 1.44\%$ 、 $0.32\% \sim 1.13\%$ (图 3)。乔木层占据植被碳密度最主要的部分( $187.56 \pm 55.11 \text{ t}/\text{hm}^2, 96.20\% \pm 2.21\%$ ), 其次为灌木层( $2.77 \pm 1.67 \text{ t}/\text{hm}^2, 1.65\% \pm 1.33\%$ )、凋落物层( $1.71 \pm 0.45 \text{ t}/\text{hm}^2, 0.95\% \pm 0.31\%$ )、细根层( $1.20 \pm 0.23 \text{ t}/\text{hm}^2, 0.68\% \pm 0.25\%$ )、草本层所占比例最小( $0.79 \pm$

表 1 风水林样地基本信息  
Table 1 Background information of geomantic forest plots

样地编号 Plot number	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	海拔 Altitude (m)	最大胸径 Max BDH (cm)	平均胸径 Mean DBH (cm)	胸高断面面积 Basal area (m <sup>2</sup> /hm <sup>2</sup> )	林分密度 Stand density (stem/hm <sup>2</sup> )
1	0	—	30	63.80	15.30	30.04	958
2	0	—	30	73.50	14.96	29.16	958
3	0	—	22	62.80	20.07	30.69	592
4	8	南	26	78.60	28.24	45.87	475
5	8	南	31	71.40	14.93	23.98	692
6	8	南	35	82.00	15.79	39.33	1033
7	0	—	27	70.00	19.97	38.62	717
8	0	—	27	78.80	17.96	33.59	608
9	0	—	27	78.90	21.52	35.29	567
10	0	—	17	53.80	12.41	35.52	1558
11	5	东	95	65.10	28.98	44.90	608
12	0	—	106	47.60	29.73	36.56	475
13	0	—	42	87.50	45.82	49.87	250
14	0	—	43	79.70	25.45	36.24	358
15	0	—	106	57.80	30.02	50.16	633

样地编号 Plot number	优势种* Dominant species	物种多样性 Species diversity			
		物种丰富度 Species richness	辛普森指数 Simpson index	香农指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Pielou index
1	木荷、九节、楝叶吴萸	21	2.06	2.61	0.58
2	木荷、九节、锥栗	20	2.06	2.54	0.57
3	木荷、破布叶、黄果厚壳桂	22	2.20	2.73	0.60
4	黄桐、木荷、米槠	23	1.78	2.39	0.52
5	九节、锥栗、黄果厚壳桂	16	1.75	2.24	0.54
6	九节、锥栗、黄桐	23	1.71	2.27	0.48
7	锥栗、九节、罗浮栲	16	1.31	2.21	0.54
8	罗浮栲、九节、木荷	17	1.68	2.15	0.51
9	马占相思、鱼骨木、九节	14	2.96	2.50	0.62
10	多毛茜草树、黄桐、米槠	33	2.16	3.02	0.58
11	罗浮栲、米槠、木荷	20	2.03	2.61	0.60
12	米槠、罗浮栲、木荷	15	1.86	2.33	0.58
13	米槠、木荷、银柴	16	1.95	2.44	0.60
14	米槠、银柴、尖叶柃	18	2.09	2.63	0.61
15	米槠、木荷、罗浮栲	16	1.91	2.40	0.59

\*：木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.)；九节 (*Psychotria rubra* (Lour.) Poir)；楝叶吴萸 (*Evodia glabrifolia* (Champ. ex Benth.) Huang)；锥栗 (*Castanopsis chinensis* Hance)；破布叶 (*Microcos paniculata* L.)；黄果厚壳桂 (*Cryptocarya concinna* Hance)；黄桐 (*Endospermum chinense* Benth.)；米槠 (*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata.)；罗浮栲 (*Castanopsis faberi* Hance)；马占相思 (*Acacia mangium* Willd.) (为当地村民引种)；鱼骨木 (*Canthium dicoccum* (Gaertn.) Teysmann et Binnedijk)；多毛茜草树 (*Aidia pycnantha* (Drake) Tirveng)；银柴 (*Aporosa dioica* (Roxb.) Muell. Arg)；尖叶柃 (*Eurya acuminatissima* Merr. et Chun)。

0.91 t / hm<sup>2</sup>, 0.53% ± 0.72%)。

2.3 土壤碳含量变化特征

2.4 植被碳密度主要影响因子

2.4.1 物种组成和群落结构

变化不大，基本稳定在 0.5%左右，且样地间的变异较小。

土壤碳含量随土层深度的增加而下降(图 4)，其中，表层土壤(0~10 cm)的碳含量最高，平均值达 1.7%，但变异系数较大，不同样地之间有较大差异；10~20 cm 土层碳含量大幅下降，变化在 0.8%~0.9%之间；20~30 cm 土层则降至 0.6%左右；30~50 cm 土层和 50~100 cm 土层的碳含量

我们分别选取风水林群落的 8 个指标与植被碳密度作相关性分析，结果表明(图 5)，植被碳密度与物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson-Weiner 多样性指数、Pielou 多样性指数以



表 2 风水林生态系统碳密度分配特征  
Table 2 Carbon density composition of geomantic forest

样地编号 Plot number	植被 Vegetation		土壤 Soil		生态系统 Ecosystem
	碳密度 Carbon density (t/hm <sup>2</sup> )	比例 Ratio (%)	碳密度 Carbon density (t/hm <sup>2</sup> )	比例 Ratio (%)	碳密度 Carbon density (t/hm <sup>2</sup> )
1	110.19	72.75	41.27	27.25	151.46
2	104.15	75.47	33.85	24.53	138.00
3	139.97	79.28	36.59	20.72	176.56
4	258.86	75.28	85.02	24.72	343.88
5	224.57	70.57	93.67	29.43	318.24
6	197.35	72.20	75.99	27.80	273.34
7	207.26	80.96	48.73	19.04	255.99
8	194.49	77.52	56.39	22.48	250.88
9	186.81	77.97	52.79	22.03	239.60
10	152.84	67.40	73.93	32.60	226.77
11	209.40	77.41	61.10	22.59	270.50
12	168.83	70.23	71.58	29.77	240.40
13	308.43	78.53	84.35	21.47	392.78
14	216.34	71.83	84.86	28.17	301.20
15	231.14	75.07	76.77	24.93	307.90
平均	194.04 ± 54.07	74.86 ± 3.88	65.13 ± 19.30	25.13 ± 3.88	259.17 ± 69.67

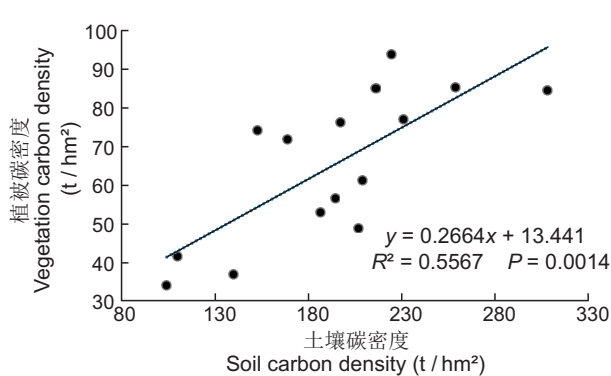


图 2 风水林植被碳密度与土壤碳密度的关系  
Fig. 2 Relationship between geomantic forest vegetation and soil carbon density

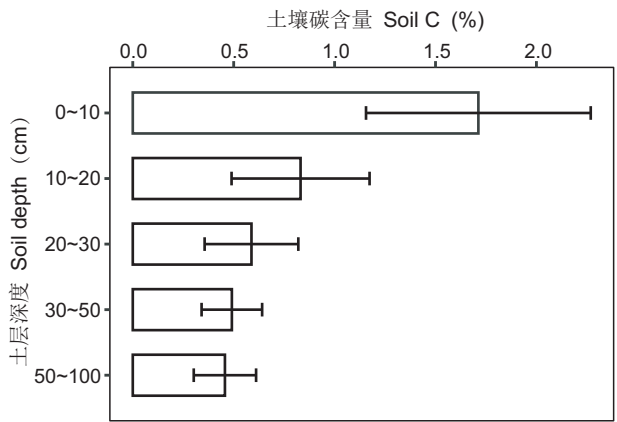


图 4 风水林土壤碳含量随土层深度的变化趋势  
Fig. 4 Soil carbon density composition of geomantic forest

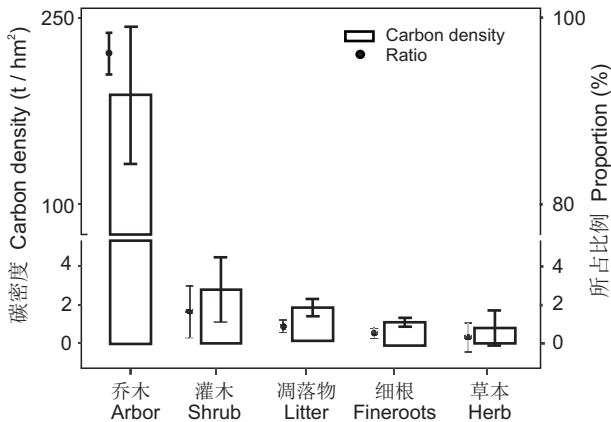
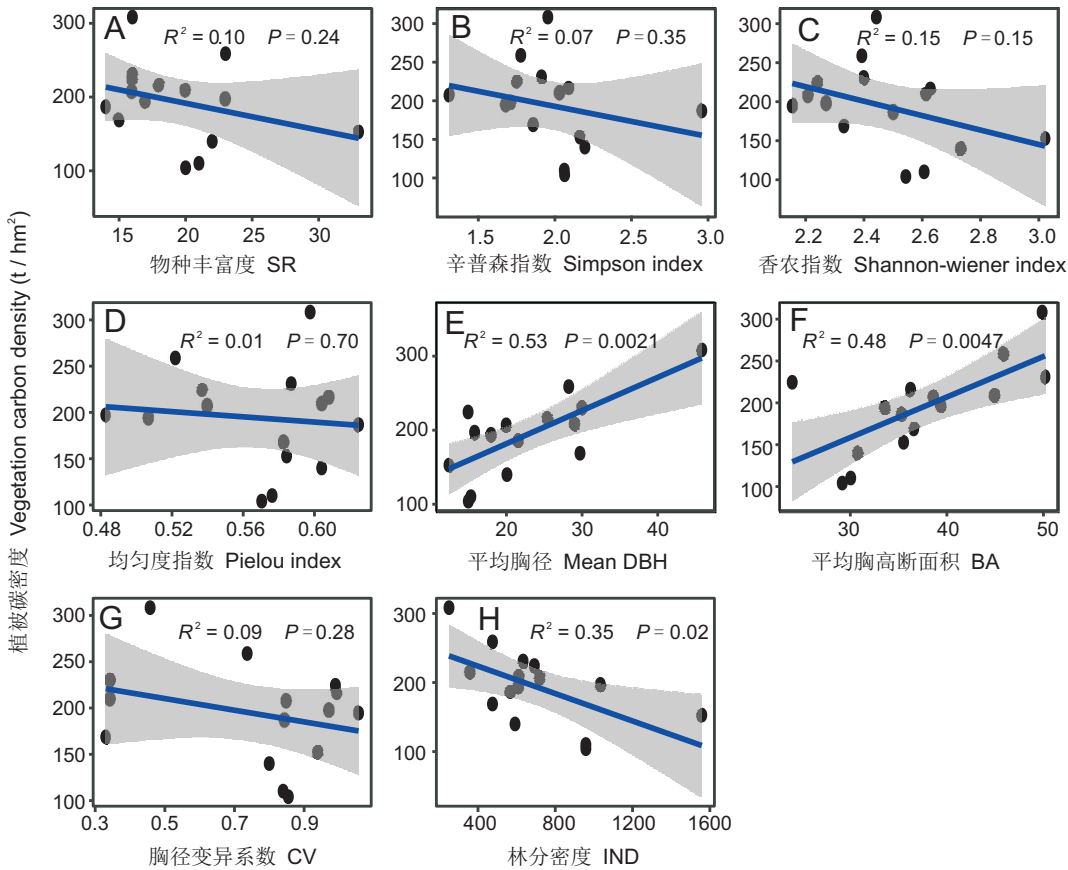


图 3 风水林植被各层碳密度分配特征  
Fig. 3 Vegetation carbon density composition of geomantic forest

及胸径变异系数的相关性不显著(图 5: A、B、C、D、G), 与林分密度呈显著负相关(图 5: H), 与平均胸径、胸高断面积呈显著正相关(图 5: E、F)。

2. 4. 2 土壤和地形

通过相关性矩阵(附图 1)简化环境因子发现, 地形因子(坡度、坡向、海拔等)等其他环境因子与植被碳密度无显著相关性。对土壤因子与植被碳密度的相关性分析结果表明, 植被碳密度与土壤容重、土壤碳含量显著正相关(图 6: A、B), 植被碳密度与土壤氮含量、土壤碳/氮比无显著关系(图 6: C、D), 即土壤碳含量越高, 土壤容重相



实线及灰色区间为线性回归模型下得到的最优拟合直线及其 95% 的置信区间。 $R^2$  表示调整后的拟合系数， $P$  值表示整个模型的显著度。下同。Solid lines and their corresponding gray areas are regression lines and 95% confidence intervals from best fit model, respectively.  $R^2$  and  $P$  are fitting coefficient and significance of whole regression model, respectively. Same below.

图 5 风水林植被碳密度与群落组成结构指标的相关性

Fig. 5 Correlation between vegetation carbon density and index of community composition structure in geomantic forest

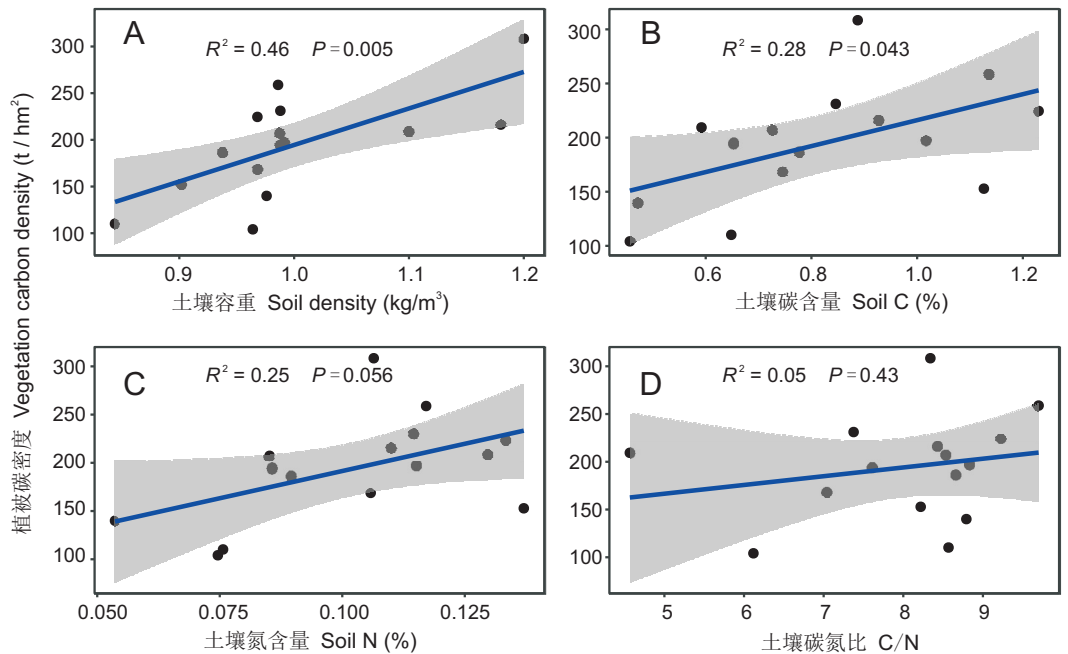


图 6 风水林植被碳密度与土壤因子的相关性

Fig. 6 Correlation between vegetation carbon density and soil factors in geomantic forest

对越大, 植被碳密度越大。

### 3 讨论

#### 3.1 风水林生态系统碳密度

本研究估算得出的风水林生态系统碳密度远高于中国森林生态系统碳密度 ( $163.7 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[3, 23]</sup> 和广州市森林生态系统碳密度 ( $178.03 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[24]</sup>, 略高于同处于南亚热带的鼎湖山自然保护区 400 年的地带性季风常绿阔叶林锥栗 (*Castanopsis chinensis* Hance)、黄果厚壳桂 (*Cryptocarya concinna* Hance) 群落 (约  $244.998 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[25]</sup>, 部分风水林群落平均碳密度超过  $300 \text{ t/hm}^2$ 。与 30 年左右林龄的人工林<sup>[26]</sup> 相比, 风水林生态系统地上部分碳存储能力较高, 植被层碳密度与土壤层碳密度之比相对较高, 且植被层碳密度远大于营建良好的格木 (*Erythrophloeum fordii* Oliv) ( $104.49 \text{ t/hm}^2$ )、红锥 (*Castanopsis hystrix* J. D. Hooker et Thomson ex A. De Candolle) ( $100.39 \text{ t/hm}^2$ ) 和马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb) ( $84.58 \text{ t/hm}^2$ ) 人工林, 但土壤碳密度 ( $65.13 \pm 19.30 \text{ t/hm}^2$ ) 远低于这些人工林 ( $138.39 \pm 26.37 \text{ t/hm}^2$ ), 本研究中风水林植被碳密度是土壤碳密度 3.06 倍 (均值), 高于鼎湖山保护区 400 年的地带性季风常绿阔叶林锥栗、黄果厚壳桂群落植被碳密度与土壤碳密度的比值 (2.33)<sup>[27]</sup>。总体来看, 风水林植被碳密度 ( $194.04 \pm 54.07 \text{ t/hm}^2$ ) 相对于鼎湖山锥栗、黄果厚壳桂群落植被碳密度 ( $155.87 \text{ t/hm}^2$ ) 较高, 而土壤碳密度 ( $65.13 \pm 19.30 \text{ t/hm}^2$ ) 相对于鼎湖山锥栗、黄果厚壳桂群落 ( $89.13 \pm 9.13 \text{ t/hm}^2$ ) 较低。部分风水林群落达到顶级群落类型, 造成二者植被碳密度不同可能是由于岭南传统历史文化, 使成熟风水林一直保存较好<sup>[28]</sup>。风水林土壤碳密度低于目前中国森林 (100 cm) 土壤平均碳密度 ( $107.8 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[29]</sup> 和我国东部地区赤红壤碳密度 ( $122.8 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[30]</sup>。一方面可能是因为不同的地理、不同气候区域及不同林分类型在碳储量及分布特征上本身差异较大<sup>[31]</sup>; 另一方面可能是因为风水林保存较好, 以高大茂盛的乔木为主, 土壤碳消耗较大, 大部分集中在植被层<sup>[31]</sup>, 同时物种组成和群落结构较复杂, 凋落物和细根 (土壤有机质的主要来源) 数量多且种类丰富, 凋落物归还和细根的分泌作用加快了碳素的周转速率<sup>[32]</sup>。虽然本研

究中的植被层碳密度增加也在显著促进土壤层碳密度的增加 ( $R^2 = 0.56$ ,  $P = 0.0014$ ), 但南亚热带较好的水热条件加快了微生物对土壤有机碳的分解作用, 使土壤养分更多地被植物吸收, 形成植被层碳密度比土壤层碳密度增加更快的格局。从各林分植被层碳密度的分配格局来看, 不同样地植被亚层次碳密度分配的差异很大, 乔木层作为森林生态系统的重要组成部分, 其碳密度占植被碳密度的 90% 以上; 林下的灌木层、草本层、凋落物层和细根层对植被碳密度的贡献远小于乔木层。

#### 3.2 风水林植被层碳密度的影响因素

平均胸高断面积和林分密度可以综合反映林分结构特征, 大量研究表明大径级个体对地上生物量的积累有显著促进作用<sup>[15, 33-37]</sup>。本研究结果也说明林分个体差异对地上生物量的积累也有促进作用<sup>[38-40]</sup>。土壤有机碳积累与森林碳密度之间的关系机制较为复杂<sup>[4, 41]</sup>。有研究表明在景观尺度上土壤因子对地上生物量空间变异的解释度达到  $1/3$ <sup>[42, 43]</sup>, 土壤理化性质在一定程度上决定着森林生态系统碳密度的分布<sup>[8]</sup>。本研究中风水林土壤容重和土壤全碳含量与植被碳密度呈显著正相关, 森林土壤与植被生长的作用是相互的<sup>[44]</sup>, 一方面土壤的理化性质和生物性状会影响群落物种组成和林分结构, 间接影响植被生物量和碳密度, 另一方面植被通过凋落物分解和细根分泌作用将有机碳归还给土壤, 增加土壤全碳含量, 间接提高土壤碳密度。这也说明天然林植被 (乔木) 生长会在促进地上生物量积累的同时, 也促进土壤有机碳的积累<sup>[45]</sup>。

#### 3.3 存在的不足

本研究调查了广州典型风水林生态系统的全组分碳储量及各组分的相对贡献率。但研究结果可能存在不足, 一是由于风水林内禁止采伐树木, 本研究在估算乔木生物量时利用的是文献中已有的生物量方程<sup>[19, 20]</sup>, 尽管我们尽量采用相似树种和相近气候条件下的生物量方程, 但仍可能给结果带来一定的偏差; 二是由于很多风水林被破坏 (工厂建造、经济林发展以及城市化影响等)<sup>[18]</sup>, 导致风水林样地较少。

本研究发现大多数风水林植被碳密度远大于同纬度鼎湖山具有 400 年历史的顶极群落季风常绿阔叶林植被碳密度 ( $155.87 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[25]</sup>, 这说明风

水林群落具有很大的固碳能力, 应充分加以保护; 此外, 研究结果可以为南亚热带人工林改造提供借鉴, 比如可以引入区域内常见的乡土阔叶树种如锥栗、米槠、荷木、黄桐等; 林分改造过程中应尽量保留大树, 适度间伐被压木等以达到优化群落结构多样性的目的, 对科学经营森林生态系统特别是碳汇林的经营管理具有重要的指导意义。

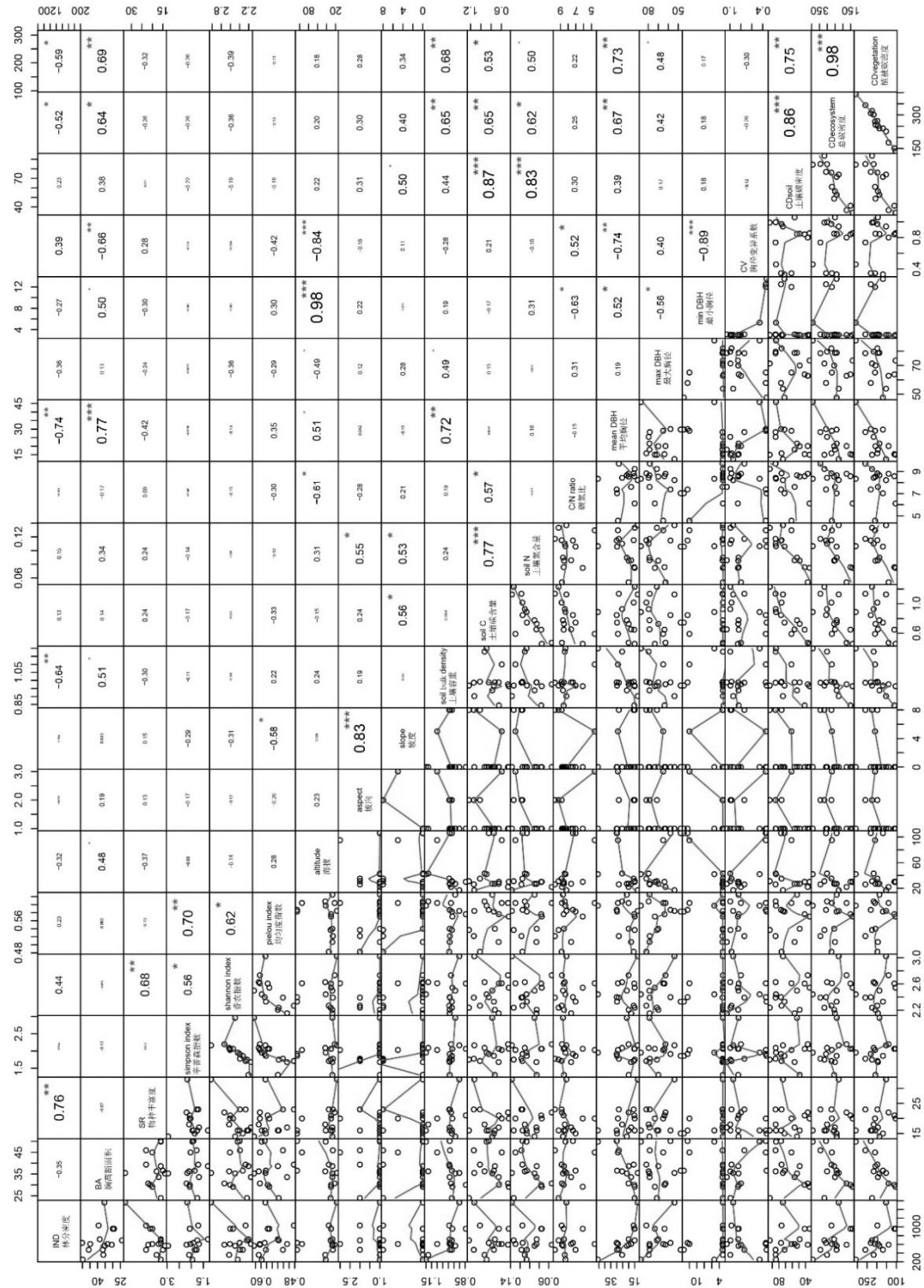
## 参考文献:

- [1] Bonan GB. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444–1449.
- [2] Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988–993.
- [3] Tang XL, Zhao X, Bai YF, Tang ZY, Wang WT, Zhao YC, *et al.* Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. *PNAS*, 2018, 115(16): 4021–4026.
- [4] Schmidt MWI, Torn MS, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens IA, *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49–56.
- [5] Todd-Brown KEO, Randerson JT, Hopkins F, Arora V, Hajima T, Jones C, *et al.* Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth system models during the 21st century[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(8): 2341–2356.
- [6] Yu GR, Chen Z, Piao SL, Peng CH, Ciais P, Wang QF, *et al.* High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region[J]. *PNAS*, 2014, 111(13): 4910–4915.
- [7] Ryan MG, Harmon ME, Birdsey RA, Giardina CP, Heath LS, Houghton RA, *et al.* A synthesis of the science on forests and carbon for U.S. forests[J]. *Issues in Ecology*, 2010, 13: 1–16.
- [8] 徐耀粘, 江明喜. 森林碳库特征及驱动因子分析研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 926–933.  
Xu YZ, Jiang MX. Forest carbon pool characteristics and advances in the researches of carbon storage and related factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 926–933.
- [9] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 692–703.  
Lv CQ, Sun SC. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5): 692–703.
- [10] 廖宇红, 陈传国, 陈红跃, 张杰, 吴钟亲, 刘烈旺, 广州市莲塘村风水林群落特征及植物多样性[J]. *生态环境学报*, 2008, 17(2): 812–817.
- [11] 沈伟剑. 珠江三角洲风水林序列及其群落生物多样性分析[D]. 广州: 中山大学, 2008.
- [12] Chen BX, Coggins C, Minor J, Zhang YQ. Fengshui forests and village landscapes in China: Geographic extent, socioecological significance, and conservation prospects[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 31(2018): 79–92.
- [13] 张瑞娟, 周璋, 李意德, 骆士寿, 李小川, 赵厚本. 广州市典型木荷风水林碳库价值核算[J]. *林业与环境科学*, 2017, 33(4): 2096–2053.  
Zhang RJ, Zhou Z, Li YD, Luo TS, Li XC, Zhao HB. Carbon storage value accounting of a typical feng-shui wood of *Schima superba* in Guangzhou City[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2017, 33(4): 2096–2053.
- [14] 卢泽彬. 东莞风水林生物量与碳储量径阶分布[J]. *中国林副特产*, 2017(5): 43–45.
- [15] Ma L, Shen CY, Lou D, Fu SL, Guan DS. Patterns of ecosystem carbon density in edge-affected fengshui forests[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 107: 216–223.
- [16] 娄铎, 陈玉娟, 刘凯, 陈瑶瑶, 马磊, 于晨曦, 管东生. 广州东部风水林斑块面积对生物量的影响[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2019, 58(1): 18–27.  
Lou D, Chen YJ, Liu K, Chen YY, Ma L, Yu CX, Guan DS. Effects of patch size variation on biomass in fengshui forest in east Guangzhou[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2019, 58(1): 18–27.
- [17] 翟石磊, 陈步峰, 林娜, 史欣, 潘永军, 邹志谨. 广州市典型森林植被的结构及多样性研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(10): 1625–1633.  
Zhai SL, Chen BF, Lin N, Shi X, Pan YJ, Zou ZJ. Structure and species diversity of typical forests in Guangzhou city[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(10): 1625–1633.
- [18] 叶华谷, 徐正春, 吴敏, 曹洪麟. 广州风水林[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013: 1–125.
- [19] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 温达志, 刘昌平, 旷远文, 王万同. 中国森林生态系统碳储量: 生物量方程[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 40–74.
- [20] 张咏梅, 周国逸, 温达志, 张德强, 张倩媚. 南亚热带季风常绿阔叶林锥栗-荷木-黄果厚壳桂群落发展趋势探讨[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 256–262.  
Zhang YM, Zhou GY, Wen DZ, Zhang DQ, Zhang QM. Dynamics of the *Castanopsis chinensis*-*Schima superba*-*Cryptocarya concinna* community of monsoon evergreen



- broadleaved forest in Dinghushan Nature Reserve in lower subtropical China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 256–262.
- [21] 徐伟强, 周璋, 赵厚本, 骆士寿, 张霞, 李健容, 徐大平, 李意德. 南亚热带3种常绿阔叶次生林的生物量结构和固碳现状[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 1938–1943.
- Xu WQ, Zhou Z, Zhao HB, Luo TS, Zhang X, Li JR, Xu DP, Li YD. Biomass structure and carbon storage in three evergreen broad-leaved secondary forests in low subtropical China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12): 1938–1943.
- [22] 史军辉, 黄忠良, 周小勇, 欧阳学军, 李炯, 张池. 鼎湖山森林群落物种多样性垂直分布格局的研究[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1143–1146.
- Shi JH, Huang ZL, Zhou XY, Ouyang XJ, Li J, Zhang C. Vertical pattern of plant community and biodiversity on the Dinghu Mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1143–1146.
- [23] Fang JY, Yu GR, Liu LL, Hu SJ, Chapin FS. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *PNAS*, 2018, 115(16): 4015–4020.
- [24] 莫江明, 方运霆, 彭少麟, Sandra B, 周国逸. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林碳素积累和分配特征[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 1970–1976.
- Mo JM, Fang YT, Peng SL, Sandra B, Zhou GY. Carbon accumulation and allocation of lower subtropical evergreen broad-leaved forests in a MAB reserve of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 1970–1976.
- [25] 栗娟, 周璋, 李意德. 广州市森林生态系统碳储量格局分析[J]. *中国城市林业*, 2016, 14(4): 15–21.
- Li J, Zhou Z, Li YD. Carbon storage pattern of forest ecosystems in Guangzhou city[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2016, 14(4): 15–21.
- [26] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 925–933.
- Wang WX, Shi ZM, Luo D, Liu SR, Lu LH, Ming AG, Yu HL. Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 925–933.
- [27] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 李德军. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1685–1694.
- Fang YT, Mo JM, Peng SL, Li DJ. Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1685–1694.
- [28] 张秋根, 任超, 王苏琴, 肖妮娜, 曹群. 江西省亚热带常绿阔叶林碳储量和碳密度的影响因子[J]. *南昌航空大学学报 (自然科学版)*, 2018, 32(4): 91–97.
- Zhang QG, Ren C, Wang SQ, Xiao NN, Cao Q. Carbon Storage and carbon density impact factor of subtropical evergreen broad-leaved forests in Jiangxi province [J]. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Science)*, 2018, 32(4): 91–97.
- [29] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437–5448.
- Liu SR, Wang H, Luan JW. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5437–5448.
- [30] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. *地理研究*, 1999, 18(4): 349–356.
- Wang SQ, Zhou CH. Estimation of terrestrial soil organic carbon stock in China[J]. *Geographical Research*, 1999, 18(4): 349–356.
- [31] 邱凤英, 肖复明, 郭捷, 林小凡, 罗坤水, 曹展波, 李光运. 江西金盆山林区天然常绿阔叶林生态系统碳储量研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(1): 105–113.
- Qiu FY, Xiao FM, Guo J, Lin XF, Luo KS, Cao ZB, Li GY. Carbon storage of evergreen broad-leaved forest, Jinpen-shan, Jiangxi province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(1): 105–113.
- [32] 兰秀, 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 彭晚霞, 刘永贤, 范稚莲, 张家涌. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2043–2053.
- Lan X, Du H, Song TQ, Zeng FP, Peng WX, Liu YX, Fan ZL, Zhang JY. Vegetation carbon storage in the main forest types in Guangxi and the related influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 2043–2053.
- [33] Stephenson NL, Das AJ, Condit R, Russo SE, Baker PJ, Beckman NG, *et al.* Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size[J]. *Nature*, 2014, 507(7490): 90–93.
- [34] Hu YQ, Su ZY, Li WB, Li JP, Ke XD. Influence of tree species composition and community structure on carbon density in a subtropical forest[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): 1–9.
- [35] Yuan ZQ, Wang SP, Gazo A, Mellard J, Lin F, Ye J, *et al.* Multiple metrics of diversity have different effects on temperate forest functioning over succession[J]. *Oecologia*, 2016, 182(4): 1175–1185.
- [36] Ali A, Yan ER, Lohbeck M. The forest strata-dependent relationship between biodiversity and aboveground biomass within a subtropical forest[J]. *Forest Ecol Manag*, 2017, 401: 125–134.
- [37] Ali A, Yan ER, Chang SX, Chang SX, Cheng JY, Liu XY. Community-weighted mean of leaf traits and divergence of wood traits predict aboveground biomass in secondary subtropical forests [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 574:

- 654–662.
- [38] Zhang Y, Chen HYH. Individual size inequality links forest diversity and above-ground biomass[J]. *J Ecol*, 2015, 103(5): 1245–1252.
- [39] 康昕, 王笑梅, 侯嫦英, 郑阿宝, 张存宽, 徐驰, 刘茂松. 林木个体大小差异对群落地上生物量及物种多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 228–2292.  
Kang X, Wang XM, Hou CY, Zheng AB, Zhang CK, Xu C, Liu MS. Effect of size inequality on aboveground biomass and species diversity of plant communities[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 228–2292.
- [40] Yuan ZQ, Wang SP, Ali A, Gazol A, Benito PR, Wang XG, *et al*. Aboveground carbon storage is driven by functional trait composition and stand structural attributes rather than biodiversity in temperate mixed forests recovering from disturbances[J]. *Ann Forest Sci*, 2018, 75(3): 67–79.
- [41] Oueslati I, Allamano P, Bonifacio E, Claps P. Vegetation and topographic control on spatial variability of soil organic carbon[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(1): 48–58.
- [42] Dewalt SJ, Chave J. Structure and biomass of four lowland neotropical forests[J]. *Biotropica*, 2004, 36(1): 7–19.
- [43] Paoli GD, Curran LM, Slik JWF. Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in southwestern Borneo[J]. *Oecologia*, 2008, 155(2): 287–299.
- [44] 石洪华, 王晓丽, 王媛, 刘振英, 麻德明. 北长山岛森林乔木层碳密度及其影响因子[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6363–6372.  
Shi HH, Wang XL, Wang A, Liu ZY, Ma DM. Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6363–6372.
- [45] Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility[J]. *Ann Forest Sci*, 2002, 59(3): 233–253.



附图 1: 植被碳密度与主要影响因子的相关性矩阵  
Appendix figure: Correlation matrix

(责任编辑: 张 平)