

夏昊钧, 郑亚纹, 周伯睿, 刘立斌, 倪健. 浙中不同林龄人工杉木成熟林碳储量全面估算[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (5): 1171-1177

Xia HJ, Zheng YW, Zhou BR, Liu LB, Ni J. Comprehensive carbon storage inventory of mature and overmature Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations with different ages in central Zhejiang Province, eastern China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2023, 29 (5): 1171-1177

浙中不同林龄人工杉木成熟林碳储量全面估算

夏昊钧¹ 郑亚纹¹ 周伯睿¹ 刘立斌^{1,2✉} 倪健^{1,2}

¹浙江师范大学化学与生命科学学院 金华 321004

²浙江金华山亚热带森林生态系统野外科学观测研究站 金华 321004

摘要 杉木人工林的碳储量虽被广泛研究,但常因含碳率应用欠妥(未考虑林龄和器官的影响),或植物生物量估算不全面(未估算乔木层伴生植物和木质残体的生物量),导致现有研究结果存在较大误差。以浙中金华北山4个林龄(28、37、42和52年)人工杉木成熟林为研究对象,测定分析不同林龄杉木人工林所有植物组分和土壤的碳含量特征,并全面估算4个林龄人工杉木成熟林的生态系统碳储量。结果表明:植物组分全碳含量变异较小而土壤有机碳含量变异较大;树龄和器官对杉木全碳含量具有显著影响;土壤有机碳含量随土层深度的增加而降低,且受林龄显著影响。4个林龄人工杉木成熟林生态系统碳储量表现为42年(160.58 t/hm²) > 28年(146.70 t/hm²) > 52年(144.84 t/hm²) > 37年(129.28 t/hm²),平均为145.35 t/hm²,各林龄杉木人工林生态系统碳储量的差异不显著;植物活体(61.27 t/hm²)、土壤(73.41 t/hm²)以及凋落物和木质残体(10.67 t/hm²)的碳储量分别占生态系统碳储量的42.3%、50.2%和7.5%。本研究表明与我国亚热带其他地区人工杉木成熟林相比,浙中金华北山人工杉木成熟林属低碳储量森林。(图4表5参41)

关键词 碳储量; 杉木人工林; 林龄; 植物组分; 土壤

Comprehensive carbon storage inventory of mature and overmature Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations with different ages in central Zhejiang Province, eastern China

XIA Haojun¹, ZHENG Yawen¹, ZHOU Borui¹, LIU Libin^{1,2✉} & NI Jian^{1,2}

¹College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

²Jinhua Mountain Observation and Research Station for Subtropical Forest Ecosystems, Jinhua 321004, China

Abstract Although carbon storage in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations has been widely investigated, the results of existing studies are inaccurate because of the improper examination of carbon content (without considering the effects of stand age and organs) and incomplete estimation of plant biomass (without estimating the biomass of associated plants in the tree layer and woody debris). In the present study, we measured and analyzed the carbon content characteristics of all plant compartments and soils in four *C. lanceolata* plantations of different ages (28 a, 37 a, 42 a, and 52 a) in the Beishan Mountains of Jinhua, central Zhejiang Province, and comprehensively estimated their ecosystem carbon storage. The results showed that the variations in the total carbon content of plant compartments were small, but those in the soil organic carbon content were large. Tree age and organ composition significantly affected the total carbon content of *C. lanceolata*. Soil organic carbon content decreased with increasing soil depth and was significantly affected by forest age. The ecosystem carbon storages of the four mature and overmature *C. lanceolata* plantations changed in the order of 42 a (160.58 t/hm²) > 28 a (146.70 t/hm²) > 52 a (144.84 t/hm²) > 37 a (129.28 t/hm²), with an average of 145.35 t/hm². No significant differences in ecosystem carbon storage were observed among the four plantations. The carbon storages of living plants (61.27 t/hm²), soils (73.41 t/hm²), and litter and woody residues (10.67 t/hm²) accounted for 42.33%, 50.22%, and 7.46% of the ecosystem carbon storage, respectively. Compared with mature and overmature *C. lanceolata* plantations in other subtropical areas of China, those in the Beishan Mountains of Jinhua, central Zhejiang Province, are low carbon storage forests.

Keywords carbon storage; *Cunninghamia lanceolata* plantation; stand age; plant compartment; soil

收稿日期 Received: 2022-07-02 接受日期 Accepted: 2022-09-06

浙江省自然科学基金/探索项目Q (LQ20C030003) 和国家自然科学基金面上项目(31870462) 资助 Supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ20C030003) and National Natural Science Foundation of China (31870462)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: liulibin@zjnu.cn)

森林是陆地生态系统碳循环的主体,不仅储存着76%-98%的陆地植被碳储量,且每年固碳量占陆地生物总固碳量的近70%,因此,森林在维持全球碳循环过程稳定和缓解全球气候变化方面起着举足轻重的作用^[1-4]。全球陆地生态系统上各种类型森林生态系统的生物量、生产力、碳储量和碳汇潜力是众多战略计划的研究重点,其研究尺度涵盖了样点、区域到全球尺度,研究方法也包括了地面样地观测、遥感估算和模型模拟等^[5-8]。然而,样点尺度的地面观测方法获得的碳循环特征数据依然是精度最高的,这些数据不仅是从样点拓展到区域和全球尺度碳循环研究的基础,也是遥感估算和植被/碳循环模型模拟方法的参数化和研究结果验证和不确定性探究的必需^[9-12]。

我国南方亚热带地区的地带性植被为世界同纬度带独特的常绿阔叶林,蕴藏着丰富的物种多样性和保有较高的植被碳储量^[13]。但该地区经济发达、人口密度大,区域内原生性常绿阔叶林在长期剧烈的人为干扰下所剩无几,取而代之的是大面积的人工林,而其中又以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林代表性最强且种植面积最广^[14-15]。有关我国亚热带地区杉木人工林固碳特征的研究较多,自20世纪70年代末期以来,大量植物生态学家和林业工作者对浙江^[16]、江西^[17]、湖南^[18]、贵州^[19]、四川^[20]、福建^[21]、广东^[22]、广西^[23]和安徽^[24]等地的杉木人工林的生物量、生产力和碳储量进行过研究。然而,大部分杉木人工林固碳特征研究仅涉及乔木(且仅仅是杉木)和林下土壤^[24-25],乔木层伴生植物、林下灌草和凋落物的研究非常少见^[23],更没有关于木质残体(枯立木和枯倒木)的研究。在计算杉木人工林碳储量时,常使用通用的含碳率0.45/0.5计算所有植物组分的碳储量^[16],而研究表明,杉木不同器官的全碳含量可存在显著差异^[21],这样的计算方法会给杉木人工林碳储量的估算带来明显误差。也有研究表明,杉木植物器官全碳含量和土壤有机碳含量会随林龄发生显著变化^[26],利用相同的植物和土壤含碳率计算不同林龄杉木人工林的碳储量存在不妥。此外,杉木人工林固碳特征随林龄的变化已有部分研究,但研究阶段多为从幼龄林至成过熟林^[23],针对成过熟林的报道匮乏。因此,有必要基于不同林龄不同组分的含碳率更高精度地全面估算亚热带地区广泛分布的人工杉木成过熟林的碳储量。

本研究以浙中4个林龄人工杉木成过熟林为研究对象,测定分析了不同林龄杉木人工林所有植物组分(包括杉木干、皮、枝、叶、根,乔木层伴生植物叶、木质,林下灌草,凋落物

和木质残体)和土壤(0-100 cm)的碳含量特征,着重探讨了树龄对杉木各器官全碳含量和林龄对土壤有机碳含量的影响,并全面估算了不同林龄人工杉木成过熟林的生态系统碳储量。本研究可为我国亚热带地区植被碳储量的估算和退化生态系统的恢复与重建以及杉木人工林的可持续经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金华北山(29°09'00"-29°16'12"N, 119°28'48"-119°49'12"E)位于浙江省中部金华市北郊,主峰大盘尖海拔1 312 m。气候温和,属典型的亚热带山地季风气候。该地区年平均气温为17.7℃,年平均降水为1 436.8 mm,年平均日照率为43.0%,年平均无霜期为256 d^[27]。地带性土壤为中亚热带山地红壤和黄壤。地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,但长期以来受人为活动的强烈干扰,原生性植被已被全部砍伐破坏,取而代之的是天然次生的常绿阔叶林(如木荷*Schima superba*林)、常绿落叶阔叶混交林(如木荷+枹栎*Quercus serrata*+枫香树*Liquidambar formosana*林)、针阔叶混交林(如马尾松*Pinus massoniana*+木荷林)、灌丛(如马银花*Rhododendron ovatum*+山胡椒*Lindera glauca*+杜鹃*Rhododendron simsii*灌丛)以及各种不同时期人工种植/飞播的针叶林(如马尾松林、柳杉*Cryptomeria japonica* var. *sinensis*林、黄山松*Pinus taiwanensis*林和杉木*Cunninghamia lanceolata*林)^[27]。

1.2 林分调查和生物量估算

金华北山南坡共有杉木人工林4.1 km²,种植于20世纪60年代末期至90年代初期。在对金华北山杉木人工林进行全面调研之后,于2020年7-8月选择1992年(林龄28 a)、1983年(37 a)、1978年(42 a)和1968年(52 a)种植的杉木人工林(4个林龄杉木人工林均进入成过熟林阶段)为研究对象,根据国际上通用的生物多样性森林永久监测样地建设的技术规范,对4个林龄人工杉木成过熟林围封样地并进行调查。每个林龄设置3个样地,样地面积根据山体 and 森林状况确定为600 m²或900 m²。对样地的经纬度、海拔、坡向、坡度、土壤覆盖率和深度(挖掘土柱)等小生境信息进行调查,并对各个样地内的木本植物进行每木检尺,起测胸径(*D*)1 cm,记录其铝牌编号、物种名、胸径、高度和坐标(表1)。

表1 杉木人工林样地概况

Table 1 General information of *Cunninghamia lanceolata* plantation plots

林龄 Stand age	样地号 Plot number	样地面积 Area (A/m ²)	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (h/m)	杉木平均胸径 Average (DBH/cm*)	杉木平均树高 Average height (H/m*)	杉木密度 Density (n/hm ²)
28 a	1	900	29°13'51"	119°41'11"	939	18.45	12.39	1722
	2	900	29°13'52"	119°41'11"	960	15.47	10.61	2100
	3	900	29°13'51"	119°41'13"	935	18.15	11.28	1600
37 a	4	600	29°14'13"	119°41'56"	719	16.05	9.75	1733
	5	900	29°14'23"	119°42'2"	703	15.00	10.72	1822
	6	600	29°14'10"	119°42'29"	728	17.08	11.92	2183
42 a	7	600	29°14'28"	119°42'26"	740	16.86	10.41	1383
	8	600	29°14'29"	119°42'24"	789	17.32	11.08	1500
	9	900	29°14'28"	119°42'24"	760	16.78	10.88	1489
52 a	10	900	29°13'50"	119°41'23"	940	15.63	9.75	1133
	11	600	29°13'50"	119°41'25"	950	12.05	8.11	1817
	12	900	29°14'1"	119°41'31"	736	17.92	10.28	1544

* 52 a杉木人工林中个体杉木植株较多,导致平均胸径和树高较小。

* More small *Cunninghamia lanceolata* individuals in 52 a forests, resulting in lower values of average diameter at breast height and height.

木本植物 ($D \geq 1\text{ cm}$) 的生物量利用生物量方程计算 (表 2). 杉木在样地中个体数量最多、生物量最大, 是本研究的重点, 其生物量用单独的生物量方程, 且按干、皮、枝、叶、根分别计算. 乔木层伴生植物中, 柳杉和黄山松在部分样地中存在较大个体, 这两个物种也用其各自的生物量方程计算, 而其他伴生植物则利用不分物种 (分常绿和落叶) 的通用生物量方程计算; 所有伴生植物的生物量仅区分叶和木质两个部分. 杉木木质残体 (枯立木和枯倒木) 死生物量利用杉木全株的生物量方程计算. 每个样地的灌草生物量 (全株挖掘) 和凋落物死生物量通过随机收获 3 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的小样方获得.

1.3 样品采集和碳含量测定

在林分每木调查后, 于每个样地内随机选择 3 株胸径较大 (以确保树龄和林分年龄一致) 的健康杉木植株采集杉木各器官样品. 杉木干样品利用瑞典产 Haglof 生长锥钻取, 皮样品利用镰刀/小刀刮取, 枝和叶样品利用枝剪 (高枝剪和小枝剪) 剪取, 根样品 (粗、中、细根混合) 利用锄头挖取. 杉木木质残体利用镰刀和生长锥获取. 灌草样品和凋落物样品从生物量小样方中择取. 所有组分植物样品在每个样地中均获得 3 份. 在每个样地的上、中和下部利用锄头各挖掘一个面积 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的土柱, 深至地下 100 cm 或岩石层 (深度不足 100 cm), 以每 10 cm 为一层分层测定土壤容重 (环刀法)、估算石砾含量并采集土壤样品 (筛除植物根系、土壤动物和石砾等).

将采集的植物样品和土壤样品烘干、粉碎并过筛 (孔径 0.25 mm), 每个样地的 3 份同一植物组分或同一土层的样品混合成一份备测. 植物全碳含量利用元素分析仪测定, 土壤有机碳含量利用重铬酸钾氧化-外加加热法测定^[32]. 伴生植物的叶和木质部分全碳含量为课题组前期在金华北山测定的 42 个物种的平均叶和木质部分全碳含量^[33].

1.4 生态系统碳储量计算

各杉木林生态系统碳储量为木本植物碳储量、灌草碳储量、凋落物和木质残体碳储量以及土壤碳储量之和. 木本植物碳储量用其各器官 (杉木分干、皮、枝、叶和根, 伴生植物分叶和木质) 生物量乘以相应全碳含量. 灌草、凋落物和木质残体碳储量用生物量/死生物量乘以相应全碳含量. 各杉木林土壤碳储量基于林下土壤覆盖率 (岩石裸露区域无土壤碳储

量)、土柱碳储量、土柱面积和样地面积计算得到, 其中各土柱有机碳储量利用下式计算.

$$\text{SOC}_n = \sum_{i=1}^n (1 - G_i) \times D_i \times C_i \times T_i$$

式中: SOC_n 为土柱 n 层土壤有机碳储量; G_i 为第 i 层土壤中石砾含量; D_i 为第 i 层土壤容重; C_i 为第 i 层土壤有机碳含量; T_i 为第 i 层土壤厚度.

1.5 数据处理

统计分析在 SPSS 24.0 中进行, 显著性水平为 0.05. 利用 Two-way ANOVA 分析树龄和器官对杉木全碳含量的影响, 分析林龄和土层对土壤有机碳含量的影响 (选择所有土柱均有的 0-40 cm 土层进行分析). 利用 One-way ANOVA 分析同一植物组分全碳含量/同一土层有机碳含量在不同树龄/林龄之间的差异以及分析不同林龄杉木人工林生态系统碳储量的差异. 利用 Origin 2018 进行作图.

2 结果与分析

2.1 不同林龄人工杉木成过熟林碳含量

不同树龄杉木各器官的全碳含量在 $432.59 \pm 21.94\text{ mg/g}$ 至 $485.93 \pm 21.94\text{ mg/g}$ 之间, 各器官的全碳含量变异均较小, 其中变异最大的根的变异系数仅为 5.1%. 树龄和器官对杉木全碳含量均具有显著 ($P < 0.05$) 影响, 而二者的交互作用对杉木全碳含量的影响不显著 ($P > 0.05$), 杉木全碳含量的影响主要来源于器官 (表 3). 杉木皮的全碳含量在各树龄间差异最为明显, 37 a 杉木皮的全碳含量显著 ($P < 0.05$) 高于 52 a 杉木皮的全碳含量 (图 1). 杉木全碳含量在各器官间总体表现为干 > 皮 > 叶 > 枝 > 根, 根的全碳含量在各树龄均表现为显著 ($P < 0.05$) 低于干、皮、枝和叶的全碳含量; 52 a 杉木干的全碳含量显著 ($P < 0.05$) 高于枝的全碳含量 (图 1).

不同林龄人工杉木成过熟林 0-40 cm 土壤有机碳含量在 $14.13 \pm 7.23\text{ mg/g}$ 至 $22.88 \pm 8.34\text{ mg/g}$ 之间, 各土层有机碳含量变异均较大, 变异系数最高可达到 51.2%. 林龄和土层均显著 ($P < 0.05$) 影响土壤有机碳含量, 而二者的交互作用对土壤有机碳含量的影响不显著 ($P > 0.05$), 土壤有机碳含量的影响更多地来源于土层, 但林龄的影响同样不可忽视 (表

表2 杉木人工林生物量方程
Table 2 Biomass models of Cunninghamia lanceolata plantations

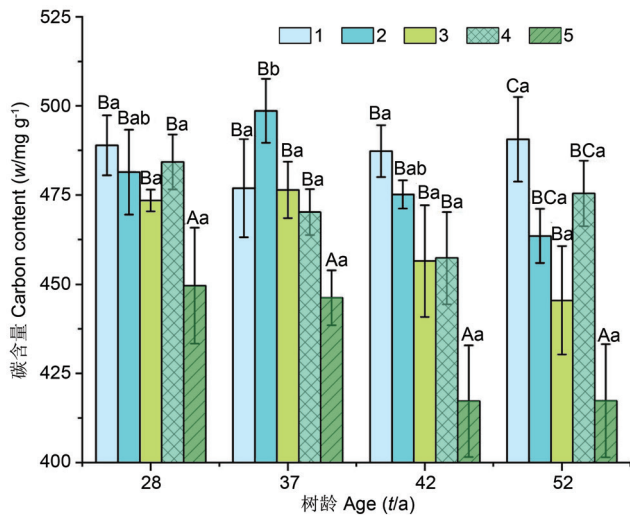
物种 Species	器官 Organ	生物量方程 Biomass models	参考文献 Reference
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	干 Stem	$W_s = 0.0320 (DH)^{1.3050}$	[28]
	皮 Bark	$W_{Ba} = 0.0089 (D^2H)^{0.8226}$	
	枝 Branch	$W_{Br} = 0.0059D^{2.2800}$	
	叶 Leaf	$W_L = 0.0115D^{2.0823}$	
	根 Root	$W_R = 0.0073D^{2.3125} + 0.0104D^{2.3901}$	
	全株 Total	$W_T = 0.0930 (D^2H)^{0.8030}$	
柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i> var. <i>sinensis</i>	叶 Leaf	$W_L = 0.2418D^{1.803}H^{-0.3995}$	[29]
	木质 Wood	$W_W = 0.1858D^{1.7728}H^{0.5557} - W_L$	
黄山松 <i>Pinus taiwanensis</i>	叶 Leaf	$W_L = 0.0004517 (D^2H)^{0.3652508}$	[30]
	木质 Wood	$W_W = 0.5599839 (D^2H) - W_L$	
其余伴生常绿物种 Other associated evergreen species	叶 Leaf	$W_L = 20.335e^{0.554D}$	[31]
	木质 Wood	$W_W = 136.175 (D^2H)^{0.7897} - W_L$	
其余伴生落叶物种 Other associated deciduous species	叶 Leaf	$W_L = 4.551D^{2.3727}$	[31]
	木质 Wood	$W_W = 86.589 (D^2H)^{0.8699} - W_L$	

D : 胸径; H : 高度; W_s : 干生物量; W_{Ba} : 皮生物量; W_{Br} : 枝生物量; W_L : 叶生物量; W_R : 根生物量; W_T : 全株生物量; W_W : 木质生物量. 胸径的单位是 cm, 高度的单位是 m. 生物量在参考文献 [28]、[29] 和 [30] 中的单位是 kg, 在 [31] 中的单位是 g.
 D : Diameter at breast height; H : Height; W_s : Stem biomass; W_{Ba} : Bark biomass; W_{Br} : Branch biomass; W_L : Leaf biomass; W_R : Root biomass; W_T : Total biomass; W_W : Wood biomass. The units of D and H are cm and m, respectively. The unit of biomass in studies of [28], [29], and [30] is kg and that in the study of [31] is g.

表3 树龄、器官及其交互作用对杉木全碳含量的影响

Table 3 Effects of age, organ, and their interaction on total carbon content of *Cunninghamia lanceolata*

因子 Factor	自由度 d_f	离差平方和 SS	均方 MS	P
树龄 Age	3	3854.66	1284.89	0.001
器官 Organ	4	20854.48	5213.62	0.000
树龄×器官 Age × organ	12	4251.27	354.27	0.063

图1 不同树龄杉木各器官的全碳含量。有相同大写字母表示同树龄不同器官间差异不显著 ($P > 0.05$)，有相同小写字母表示同器官不同树龄间差异不显著 ($P > 0.05$)。1: 干; 2: 皮; 3: 枝; 4: 叶; 5: 根。Fig. 1 Total carbon content of different organs of *Cunninghamia lanceolata* with different ages. Same capital letters meant no significant difference at the 0.05 level among organs with same age; same small letters meant no significant difference at the 0.05 level among ages of a certain organ. 1: Stem; 2: Bark; 3: Branch; 4: Leaf; 5: Root.

4). 土壤有机碳含量随土层深度的增加而降低，尤其是在52a杉木人工林，表层 (0-10 cm) 土壤的有机碳含量显著 ($P < 0.05$) 高于深层次土壤的有机碳含量 (图2)。

表4 杉木林龄、土层及其交互作用对土壤含量的影响

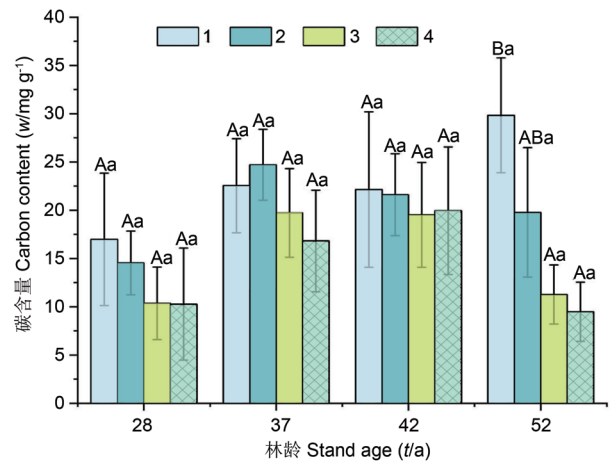
Table 4 Effects of stand age, soil depth, and their interaction on soil organic carbon content in *Cunninghamia lanceolata* plantations

因子 Factor	自由度 d_f	离差平方和 SS	均方 MS	P
林龄 Age	3	495.563	165.188	0.017
土层 Soil depth	3	613.871	204.624	0.007
林龄×土层 Age × soil depth	9	386.279	42.920	0.442

不同林龄人工杉木成过熟林灌草、凋落物和木质残体的全碳含量分别为 427.84 ± 27.64 mg/g、 462.51 ± 9.03 mg/g 和 470.20 ± 6.27 mg/g，三者全碳含量变异均较小。林龄对灌草、凋落物和木质残体的全碳含量的影响均不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 不同林龄人工杉木成过熟林碳储量

不同林龄人工杉木成过熟林杉木的碳储量随林龄的增加逐步降低，28 a、37 a、42 a和52 a人工林杉木的碳储量分别为 62.55 t/hm²、 58.45 t/hm²、 50.10 t/hm²和 39.16 t/hm²，平均为 52.56 t/hm² (表5)。不同林龄人工林杉木各器官碳储量的分配一致，均表现为干>根>皮>叶>枝 (表5)，且各器官碳储量占杉木总碳储量的比例在各林龄间波动很小，干碳储量占杉木总碳储量的比例为50.6%-52.8%，根为22.6%-

图2 不同林龄杉木人工林土壤不同深度碳含量。有相同大写字母表示同林龄不同土层间差异不显著 ($P > 0.05$)，有相同小写字母表示同土层不同林龄间差异不显著 ($P > 0.05$)。1: 0-10 cm; 2: 10-20 cm; 3: 20-30 cm; 4: 30-40 cm。Fig. 2 Soil organic carbon content at different depth of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages.

Same capital letters meant no significant difference at 0.05 level among soil layers with same stand age; same small letters meant no significant difference at 0.05 level among stand ages of a certain soil layer. 1: 0-10 cm; 2: 10-20 cm; 3: 20-30 cm; 4: 30-40 cm.

24.0%，皮为11.3%-12.2%，叶为6.8%-7.6%，枝为6.2%-6.6% (图3)。不同林龄人工杉木成过熟林土壤有机碳储量随林龄的增加呈先降低后升高趋势，28 a、37 a、42 a和52 a人工林土壤有机碳储量分别是 68.57 t/hm²、 54.01 t/hm²、 84.83 t/hm²和 86.22 t/hm²，平均为 73.41 t/hm² (表5)。土壤有机碳储量随土壤深度的增加而降低，大约50%的土壤有机碳存储在0-20 cm土层中，超过70%的土壤有机碳存储在0-40 cm土层中 (表5)。

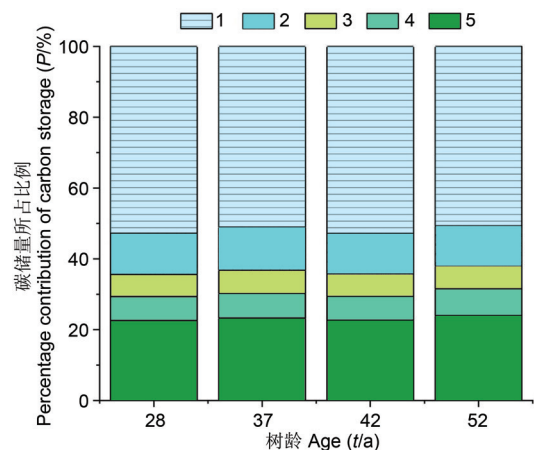


图3 不同林龄杉木各器官碳储量百分比。1: 干; 2: 皮; 3: 枝; 4: 叶; 5: 根。

Fig. 3 Carbon storage percentages of different organs of *Cunninghamia lanceolata* with different ages. 1: Stem; 2: Bark; 3: Branch; 4: Leaf; 5: Root.

不同林龄人工杉木成过熟林生态系统总碳储量在 129.28 t/hm²至 160.58 t/hm²之间，平均为 145.35 t/hm²。42 a杉木林生态系统总碳储量最高，而37 a杉木林最低，但各林龄杉木人工林生态系统碳储量的差异并不显著 ($P > 0.05$) (表5)。植物活体 (包括杉木、伴生植物和灌草) 碳储量占生态系统总碳储量的35.3%-47.7% (平均为42.3%)，土壤的碳储量占生态系

表5 不同林龄杉木人工林各组分碳储量 (M/t hm⁻²)
Table 5 Carbon storages (M/t hm⁻²) of different compartments of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages

组分 Compartment		林龄 Age (t/a)			
		28	37	42	52
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	干 Stem	33.01 ± 3.77	29.83 ± 6.70	25.97 ± 1.67	19.83 ± 5.55
	皮 Bark	7.26 ± 0.69	7.13 ± 1.78	5.85 ± 0.38	4.42 ± 1.29
	枝 Branch	3.89 ± 0.24	3.87 ± 0.61	3.27 ± 0.23	2.56 ± 0.85
	叶 Leaf	4.27 ± 0.25	4.02 ± 0.79	3.46 ± 0.29	2.97 ± 1.01
	根 Root	14.12 ± 1.06	13.60 ± 2.87	11.55 ± 1.19	9.39 ± 3.75
伴生植物 Associated species		0.98 ± 0.18	2.31 ± 1.10	14.85 ± 12.30	11.44 ± 5.94
灌草 Shrub and grass		2.78 ± 2.73	0.85 ± 0.31	0.99 ± 0.40	0.52 ± 0.57
凋落物 Litter		5.80 ± 3.90	4.65 ± 0.94	3.74 ± 0.99	2.62 ± 0.30
木质残体 Woody debris		6.01 ± 0.99	8.91 ± 3.75	6.06 ± 1.91	4.88 ± 1.96
土壤 Soil	0-10 cm	16.11 ± 8.23	15.42 ± 6.65	19.47 ± 9.61	27.92 ± 5.64
	10-20 cm	13.72 ± 4.17	13.82 ± 6.30	18.01 ± 9.84	18.33 ± 6.31
	20-30 cm	10.21 ± 4.85	6.08 ± 3.40	15.55 ± 11.24	7.98 ± 4.03
	30-40 cm	10.01 ± 6.75	4.44 ± 3.08	16.02 ± 12.02	6.55 ± 3.36
	40-50 cm	18.53*	3.92 ± 3.17	13.49 ± 11.74	6.21 ± 3.41
	50-60 cm	18.53*	10.43*	2.30*	4.93 ± 2.33
	60-70 cm	18.53*	10.43*	/	5.33 ± 2.16
	70-80 cm	18.53*	10.43*	/	3.90 ± 1.47
	80-90 cm	18.53*	10.43*	/	5.06*
	90-100 cm	18.53*	/	/	5.06*
合计 Total		146.70 ± 32.77	129.28 ± 13.41	160.58 ± 31.77	144.84 ± 3.13

*值为森林土壤总碳储量减去之上土层碳储量。
*Values mean soil total organic carbon storage minus organic carbon storage of upper layers of soil.

统总碳储量的41.8%-59.5% (平均为50.2%)，二者是生态系统总碳储量的主要贡献者，而凋落物和木质残体的碳储量仅占生态系统总碳储量的5.2%-10.5% (平均为7.5%) (图4)。

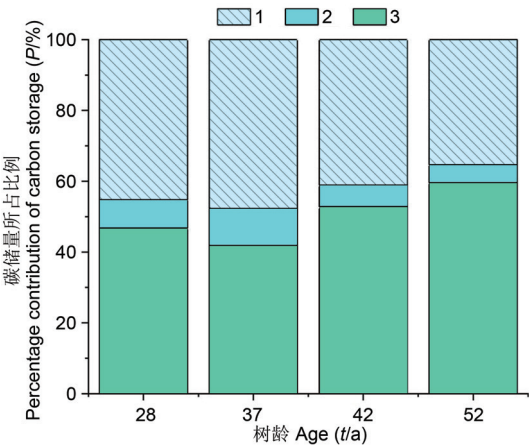


图4 不同林龄杉木人工林各组分碳储量百分比。1: 植物活体生物量碳储量; 2: 凋落物和木质残体死生物量碳储量; 3: 土壤有机碳储量。
Fig. 4 Carbon storage percentages of different compartments of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages. 1: Living biomass carbon storage; 2: Litter and woody debris Necromass carbon storage; 3: Soil organic carbon storage.

3 讨论

杉木人工林在我国南方地区分布广泛且碳密度可观，在区域碳循环方面发挥重要作用^[7, 15]，因此，杉木人工林的碳储量研究一直以来受到广泛关注。然而，或因森林组分含碳率应用欠妥（如未考虑林龄和器官对杉木碳含量的影响），或因植物生物量估算不够全面（如未估算乔木层伴生植物和木质残体的生物量），导致现有杉木人工林的碳储量估算存在较大误差。本研究在测定不同林龄杉木人工林不同组分碳含量的基础上，较高精度且全面地估算了浙中地区人工杉木成熟

林所有植物和土壤组分的碳储量特征。但本研究也有一些不足。测定碳含量采集的植物和土壤样品数量较少，这对森林植物碳储量的估算影响不大，因为植物全碳含量变异较小；但对森林土壤有机碳储量估算的影响不容忽视，因为土壤有机碳含量的变异较大，同一林龄同一土层土壤有机碳含量变异系数可高达51.2%，最高含量是最低含量的4.4倍。因此，在进行杉木人工林土壤有机碳含量测定和储量估算时，有必要采集并测定更多的土壤样品。乔木层伴生植物的叶和木质部分全碳含量采用的是课题组前期在金华北山测定的42个常见物种的平均全碳含量，这样的处理方法会给伴生植物碳储量的估算带来一定的影响（但影响有限，因伴生植物的生物量占比不高）。另外，构建成过熟林杉木植株的生物量方程也是未来杉木人工林碳储量及其分配特征研究的方向之一。

因气候、土壤、林龄和经营方式等的不同，杉木各器官全碳含量差异研究以及林龄对杉木人工林植物全碳和土壤有机碳含量影响研究的结果各异^[34]。陶玉华等发现杉木各器官全碳含量差异明显^[35]，且受林龄的影响，但林下土壤有机碳含量与林龄无关。兰斯安等的研究结果^[23]则正好相反，植物全碳含量不受器官和林龄影响，但土壤有机碳含量随林龄变化明显。宋良友等认为林龄并不影响杉木各器官全碳含量^[36]。张芸等^[37]和Chen等^[38]的研究表明林龄对土壤有机碳含量并无影响，曹娟等则表示林龄显著影响土壤有机碳含量^[39]。而李明军等^[26]和本研究则发现杉木各器官全碳含量差异显著，树/林龄对植物全碳含量和土壤有机碳含量均具有显著影响。说明在估算金华北山杉木人工林碳储量时，有必要分别林龄分别器官估算。杉木人工林碳储量的研究普遍表明森林碳储量随林龄的增加而升高，但到近熟林后，森林碳储量变化不大^[23]。本研究4个杉木人工林均为成熟林，碳储量虽有一定差异，但差异并不显著。

浙江省金华北山人工杉木成熟林的生态系统碳储量平均为145.35 t/hm²，其中植物活体碳储量61.27 t/hm²，土壤碳储量73.41 t/hm²，凋落物和木质残体碳储量10.67 t/hm²。

与我国亚热带地区其他省份的人工杉木成熟林和过熟林相比^[17, 23, 35-36, 40], 除了凋落物碳储量较高外, 浙江省金华北山人工杉木成过熟林不管是植物活体碳储量、土壤碳储量还是生态系统碳储量均较低, 反映出浙江中部地区森林存在着林龄高而碳储量低的事实^[16]。

我国南方亚热带地区原生性常绿阔叶林破坏甚为严重, 当前植被普遍为天然次生阔叶林和以杉木林为代表的人工林, 而后者因生长迅速, 不仅能够满足我国经济增长的用材需求, 且在固碳能力方面普遍高于前者^[16]。但多年来不少研究表明部分杉木人工林因不科学的造林和经营模式导致的木材蓄积量/碳储量增加困难现象愈发常见^[41], 本研究的金华北山杉木人工林正是这类低效林的代表之一。因此, 基于较高精度的样点尺度地面观测方法全面摸清杉木人工林所有植物和土壤组分的碳储量特征, 不仅可以为区域植被碳储量的精确估算

提供基础数据, 而且可以为进一步探究杉木人工林的科学经营管理模式起到促进作用。

4 结论

本研究较高精度地估算了浙中不同林龄人工杉木成过熟林的碳储量。发现树龄和器官对杉木全碳含量, 林龄对土壤有机碳含量具有显著影响。不同林龄人工杉木成过熟林生态系统碳储量平均为145.35 t/hm², 植物活体、土壤以及凋落物和木质残体的碳储量分别占生态系统总碳储量的42.3%、50.2%和7.5%。与亚热带其他地区人工杉木成过熟林相比, 浙中杉木人工林属低碳储量森林。构建成过熟林杉木植株的生物量方程和测定更多的土壤样品是未来人工杉木成过熟林碳储量高精度估算的方向。

参考文献 [References]

- Kramer PJ. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production [J]. *Bioscience*, 1981, **31** (1): 29-33
- Melillo JM, McGuire AD, Kicklighter DW, Moore B, Vorosmarty CJ, Schloss AL. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 1993, **363** (2): 234-240
- Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala S, McGuire AD, Piao SL, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, **333** (4): 988-993
- Koh LP, Zeng YW, Sarira TV, Siman K. Carbon prospecting in tropical forests for climate change mitigation [J]. *Nat Commun*, 2021, **12** (10): 1271-1289
- Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: Approaching a more accurate estimate [J]. *Climat Chang*, 2013, **119** (5): 905-917
- Köhl M, Lasco R, Cifuentes M, Jonsson O, Korhonen KT, Mundhenk P, Navar JD, Stinson G. Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment [J]. *For Ecol Manag*, 2015, **352** (1): 21-34
- Liu LB, Yang HM, Xu Y, Guo YM, Ni J. Forest biomass and net primary productivity in southwestern China: A meta-analysis focusing on environmental driving factors [J]. *Forests*, 2016, **7** (1): 173-189
- Sarira TV, Zeng YW, Neugarten R, Chaplin-Kramer R, Koh LP. Co-benefits of forest carbon projects in Southeast Asia [J]. *Nat Sustain*, 2022, **2** (11): 6443
- Ketterings QM, Coe R, van Noordwijk M, Ambagau Y, Palm CA. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground biomass in mixed secondary forests [J]. *For Ecol Manag*, 2001, **146** (1): 199-209
- Ni J. Net primary productivity in forests of China: Scaling-up of national inventory data and comparison with model predictions [J]. *For Ecol Manag*, 2003, **187** (3): 485-495
- 罗云建, 王效科, 张小全, 逯非. 中国森林生态系统生物量及其分配研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013 [Luo YJ, Wang XK, Zhang XQ, Lu F. Biomass and Its Allocation of Forest Ecosystems in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013]
- Guo YM, Ni J, Liu LB, Wu YY, Guo CZ, Xu X, Zhong QL. Estimating aboveground biomass using Pléiades satellite image in a karst watershed of Guizhou Province, southwestern China [J]. *J Mt Sci*, 2018, **15** (11): 1020-1034
- 宋永昌, 陈小勇, 王希华. 中国常绿阔叶林研究的回顾与展望[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, **1** (1): 1-8 [Song YC, Chen XY, Wang XH. Studies on evergreen broad-leaved forest of China: A retrospect and prospect [J]. *J East China Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2005, **1** (1): 1-8]
- 宋永昌. 中国常绿阔叶林: 分类, 生态, 保育[M]. 北京: 科学出版社, 2013 [Song YC. Chinese Evergreen Broad-leaved Forest: Classification, Ecology, Conservation [M]. Beijing: Science Press, 2013]
- 国家林业和草原局. 2014-2018中国森林资源报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019 [National Forestry and Grassland Administration. China Forest Resources Report (2014-2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019]
- 钱逸凡, 伊力塔, 张超, 余树全, 沈露, 彭冬琴, 郑超超. 浙江省中部地区公益林生物量与碳储量[J]. 林业科学, 2013, **49** (5): 17-23 [Qian YF, Yi LT, Zhang C, Yu SQ, Shen L, Peng DQ, Zheng CC. Biomass and carbon storage of public service forests in the central area of Zhejiang Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49** (5): 17-23]
- 曾伟, 江斌, 熊彩云, 肖复明, 张开珍. 江西省不同林龄杉木碳储量分配格局[J]. 中国农学通报, 2015, **31** (28): 1-5 [Zeng W, Jiang B, Xiong CY, Xiao FM, Zhang ZK. Carbon storage allocation pattern of *Cunninghamia lanceolata* plantations at different stages in Jiangxi Province [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, **31** (28): 1-5]
- Xiang WH, Li LH, Ouyang S, Xiao WF, Zeng LX, Chen L, Lei PF, Deng XW, Zeng YL, Fang JP, Forrester DI. Effects of stand age on tree biomass partitioning and allometric equations in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. *Eur J For Res*, 2021, **140** (6): 317-332
- 刘延惠, 丁访军, 崔迎春, 谢涛, 马亨发, 赵文君, 王晓荣. 黔中地区不同林龄杉木人工林碳贮量及其分配特征[J]. 水土保持学报, 2015, **29** (4): 278-283 [Liu YH, Ding FJ, Cui YC, Xie T, Ma HF, Zhao WJ, Wang XR. Carbon storage and its allocation characters of Chinese fir plantation in different stand ages in the middle part of Guizhou [J]. *J Soil Water Conserv*, 2015, **29** (4): 278-283]
- 马松莉, 邹成坤, 兰立达, 李德文. 皆伐炼山对华西南屏区杉木人工

- 林碳库的影响[J]. 四川林业科技, 2013, **34** (6): 48-51 [Ma SL, Zou CK, Lan LD, Li DW. Effects of clear-cutting and slash burning on carbon stock of Chinese fir plantation in the rainy area of southwest China [J]. *Sichuan For Sci Technol*, 2013, **34** (6): 48-51]
- 21 Zhou LL, Li SB, Liu B, Wu PF, Heal KV, Ma XQ. Tissue-specific carbon concentration, carbon stock, and distribution in *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook plantations at various developmental stages in subtropical China [J]. *Ann For Sci*, 2019, **76** (3): 70
 - 22 黄春华, 周光益, 赵厚本, 周志平, 邱治军. 广东天井山成熟杉木人工林根系生物量的测定[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33** (9): 80-86 [Huang CH, Zhou GY, Zhao HB, Zhou ZP, Qiu ZJ. Determination of root system biomass of matured *Cunninghamia lanceolata* plantation in Tianjingshan Forest Farm, Guangdong Province [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2013, **33** (9): 80-86]
 - 23 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 韩畅, 陈莉, 苏樑. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报, 2016, **27** (4): 1125-1134 [Lan SA, Du H, Zeng FP, Song TQ, Peng WX, Han C, Chen L, Su L. Carbon storage and allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27** (4): 1125-1134]
 - 24 施文涛, 谢昕云, 刘西军, 张驰, 柯立, 徐小牛. 安徽大别山区杉木人工林乔木层生物量模型及碳储量[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24** (5): 758-764 [Shi WT, Xie XY, Liu XJ, Zhang C, Ke L, Xu XN. Biomass model and carbon storage of Chinese fir plantation in Dabieshan mountains in Anhui [J]. *Resour Environ Yangtze Val*, 2015, **24** (5): 758-764]
 - 25 李智超, 张勇强, 宋立国, 厚凌宇, 孙启武. 江西大岗山不同林龄杉木人工林土壤碳氮储量[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, **39** (10): 116-122 [Li ZC, Zhang YQ, Song LG, Hou LY, Sun QW. Storage of carbon and nitrogen in Chinese fir plantations at different ages in Dagang mountain of Jiangxi Province [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2019, **39** (10): 116-122]
 - 26 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 黄宗胜, 石建华. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤C、N、P化学计量特征及互作关系[J]. 生态学报, 2018, **38** (21): 7772-7781 [Li MJ, Yu LF, Du MF, Huang ZS, Shi JH. C, N, and P stoichiometry and their interaction with plants, litter, and soil in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different ages [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (21): 7772-7781]
 - 27 樊海东, 陈海燕, 吴雁南, 刘建峰, 徐德宇, 曹嘉瑜, 袁泉, 谭斌, 刘晓彤, 徐佳, 王国敏, 韩文娟, 刘立斌, 倪健. 金华北山南坡主要植被类型的群落特征[J]. 植物生态学报, 2019, **43** (10): 921-928 [Fan HD, Chen HY, Wu YN, Liu JF, Xu DY, Cao JY, Yuan Q, Tan B, Liu XT, Xu J, Wang GM, Han WJ, Liu LB, Ni J. Community characteristics of main vegetation types on the southern slope of Beishan Mountain in Jinhua, Zhejiang, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2019, **43** (10): 921-928]
 - 28 李燕, 张建国, 段爱国, 相聪伟. 杉木人工林生物量估算模型的选择[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (12): 3036-3046 [Li Y, Zhang JG, Duan AG, Xiang CW. Selection of biomass estimation models for Chinese fir plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (12): 3036-3046]
 - 29 覃世杰, 李况, 莫德祥, 吴庆标. 桂东南柳杉人工林生物量回归模型应用研究[J]. 南方农业学报, 2013, **44** (2): 261-265 [Qin SJ, Li K, Mo DX, Wu QB. Biomass regression model of the *Cryptomeria fortunei* plantation in southeast subtropical region of Guangxi [J]. *J South Agric*, 2013, **44** (2): 261-265]
 - 30 胡道连, 李志辉, 谢旭东. 黄山松人工林生物产量及生产力的研究[J]. 中南林业学院学报, 1998, **18** (1): 60-64 [Hu DL, Li ZH, Xie XD. Study of biomass and productivity of *Pinus taiwanensis* plantation [J]. *Cent South Univ For Technol*, 1998, **18** (1): 60-64]
 - 31 陈启瑞, 沈琪. 浙江次生青冈林林木层的生物量模型及其分析c. 植物生态学与地植物学学报, 1993, **17** (1): 38-47 [Chen QC, Shen Q. Studies on the biomass models of the tree stratum of secondary *Gycloblanopsis glauca* forest in Zhejiang [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1993, **17** (1): 38-47]
 - 32 国家林业局. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算: LY/T 1237-1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999 [State Forestry Administration. Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio: LY/T 1237-1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999]
 - 33 曹嘉瑜. 金华北山植物小枝功能性状及其与环境的关系[D]. 金华: 浙江师范大学, 2020 [Cao JY. Plant functional traits of twigs and their relationships with environmental factors in Beishan Mountain of Jinhua, Zhejiang [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2020]
 - 34 Yang YH, Luo YQ, Finzi AC. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis [J]. *New Phytol*, 2011, **190** (10): 977-989
 - 35 陶玉华, 白丽蓉. 广西罗城不同林龄杉木人工林碳储量的变化趋势[J]. 钦州学院学报, 2018, **33** (10): 48-53 [Tao YH, Bai LR. Carbon storage changing trends of Chinese fir plantation of different ages in Luocheng, Guangxi [J]. *J Qinzhou Univ*, 2018, **33** (10): 48-53]
 - 36 宋良友, 何功秀. 不同林龄阶段杉木人工林生物量何碳储量的分布特征[J]. 湖南林业科技, 2021, **48** (1): 71-75 [Song LY, He GX. Distribution characteristics of biomass and carbon storage of *Cunninghamia lanceolata* plantation in different age stages [J]. *Hunan For Sci Technol*, 2021, **48** (1): 71-75]
 - 37 张芸, 李惠通, 张辉, 黄彬彬, 刘春华, 蒋宗培, 马祥庆. 不同林龄杉木人工林土壤C:N:P化学计量特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2019, **39** (7): 2520-2531 [Zhang Y, Li HT, Zhang H, Huang BB, Liu CH, Jiang ZK, Ma XQ. Soil C:N:P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (7): 2520-2531]
 - 38 Chen GS, Yang ZJ, Gao R, Xie JS, Guo JF, Huang ZQ, Yang YS. Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China [J]. *For Ecol Manag*, 2013, **300** (1): 68-76
 - 39 曹娟, 闫文德, 项文化, 谌小勇, 雷丕锋. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, **51** (7): 1-8 [Cao J, Yan WD, Xiang WH, Chen XY, Lei PF. Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantation at three different ages in Huitong, Hunan Province, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51** (7): 1-8]
 - 40 梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力[J]. 生态学杂志, 2016, **35** (4): 896-902 [Liang MJ, Chen LC, Wang SL. The allocation pattern of carbon storage and carbon sequestration potential in Chinese fir plantation ecosystems in Hunan Province [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35** (4): 896-902]
 - 41 夏丽丹, 于姣姐, 邓玲玲, 李小艳, 周垂帆, 徐永兴. 杉木人工林地力衰退研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, **31** (2): 37-42 [Xia LD, Yu JD, Deng LL, Li XY, Zhou CF, Xu YX. Researches on soil decline of Chinese fir plantation [J]. *World For Res*, 2018, **31** (2): 37-42]