基于树木年轮信息的宝天曼不同径级华山松碳储量动态变化

王婷^①, 任思远^①, 陈云^②, 袁志良^②, 李鹿鑫^①, 潘娜^①, 叶永忠^{②*}

① 河南农业大学林学院, 郑州 450002;

② 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002

* 联系人, E-mail: yeyzh@163.com

2014-07-25 收稿, 2014-09-05 接受, 2014-10-20 网络版发表

国家自然科学基金(31270493)和植被与环境变化国家重点实验室 2012 年开放课题(LVEC-2012kf06)资助

摘要 基于树木年轮学方法, 本文分 3 个不同径级研究了宝天曼自然保护区华山松碳储量的动态变化. 研究发现: (1) 随着径级的增大, 小径级 A (DBH≤15 cm)、中径级 B (15<DBH≤25 cm) 和大径级 C (DBH>25 cm) 华山松碳储量分别为 2.757, 9.211, 15.408 t/hm², 它们年均增加的碳储量分别为 0.0685, 0.1535, 0.136 t/hm²; (2) 中径级华山松林分密度和径向生长量最大, 其年均碳储量增长量大于大径级华山松和小径级华山松; (3) 大径级华山松每年碳储量增长量决定着华山松林总碳储量的变化. 个体死亡率是限制中小径级华山松碳储量增长的重要因素, 树木生理生长的影响是限制大径级华山松碳储量增加的主要因素. 研究结果表明, 利用树木年代学序列能较好地探讨宝天曼华山松生长趋势和评估碳储量的动态变化.

关键词

华山松
树木年轮
不同径级
碳储量
动态变化

工业化发展、人口剧增、化石燃料的大量使用和对森林的过度采伐, 使得大气 CO₂ 浓度增加, 造成温室效应等一系列全球性生态问题^[1]. 森林植物能吸收大气中的 CO₂ 并将其固定在植被或土壤中, 从而减少 CO₂ 在大气中的浓度, 森林生态系统在监控陆地生态系统的气候变化、碳储量动态方面有着不可替代的作用. 人们尝试将人为排放的碳转入森林生态系统, 降低温室气体排放量, 可以减缓全球变暖的进程^[2].

森林生物量和碳储量动态变化研究有助于揭示气候变化和植被之间的关系, 充分理解和认识森林在不同恢复过程中的林分生物量及其动态特征, 对全球碳循环评估意义重大^[3]. 碳储量的研究方法主要有样地调查法^[4]、通量观测法^[5]、模型模拟法^[6]、遥感估算法^[7]和树木年轮法^[8]. 样地调查法是通过建立永久样地, 每年、或者 5 或 10 年对胸径和树高等一些因子调查来计算碳储量, 但是该方法耗时长、投入

量大; 通量观测法直接对森林与大气之间的通量进行计算, 却成本高、范围小, 而且只能估算当年的碳储量; 模型模拟法是通过建立数学模型, 综合模拟植被的光合作用和呼吸作用以及它们与环境间的相互关系, 来估算森林生态系统的净初级生产力和碳储量. 相关方法能够获取森林长期累积的^[4]或当年的^[5]生物量和碳储量, 然而对获取森林发育过程中的生物量和蓄积量动态信息较为困难.

树木年轮记录了树木每年生长的丰富信息, 能够提供较为详细的年分辨率数据^[9,10], 是估算森林生物量及碳蓄积量的有用信息源^[11-13]. 研究表明, 树木年轮分析法在对一些树种年增长率进行回顾性评估时的数据精确度高于其他评估法^[14]. 邵全琴等人^[15]尝试用树木年轮法创建 TGTRing 模型探讨江西千烟洲几种针叶树人工林乔木层每年生物量和碳蓄积量的变化; Liu 等人^[16]和张远东等人^[17]基于树木年

引用格式: 王婷, 任思远, 陈云, 等. 基于树木年轮信息的宝天曼不同径级华山松碳储量动态变化. 科学通报, 2014, 59: 3499–3507

Wang T, Ren S Y, Chen Y, et al. Dynamic of carbon storage of *Pinus armandii* forest at different diameter levels based on tree ring data in the Baotianman National Nature Reserve, central China (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 3499–3507, doi: 10.1360/N972014-00403

轮法对川西亚高山林区不同恢复途径下森林乔木层生物量和碳储量进行了研究. 相关研究表明, 树木年轮法可用在森林碳动态研究中^[18-20], 监控森林不同演替阶段生物量和碳储量的变化.

利用树木年轮法评估森林生物量和碳储量变化的相关研究大都是基于调查树木当前的胸径和树高生长量, 对不同生长时期进行研究的比较少, 树木不同生长时期胸径和树高的生长速率是不同的^[21]. 森林中树木的径级结构是林木更新过程快慢的反映^[22], 也是林木种群不同生长时期的反映. 忽略树木不同生长时期的碳动态变化会增加森林碳储量估算结果的不确定性.

华山松(*Pinus armandii*)是河南省伏牛山、太行山较高山地重要针叶树种之一, 对当地的森林生态系统有着重要作用. 宝天曼自然保护区地处伏牛山南坡, 属南暖温带-北亚热带过渡区, 区内森林覆盖率高达 97.8%, 华山松主要分布于海拔 1600~1750 m 的垂直范围, 和锐齿槲栎组成针阔叶混交林. 本文以宝天曼华山松为研究对象, 尝试以树木年代序列为基础, 探讨不同径级华山松碳储量的动态变化, 进而获得华山松林年际碳储量的动态特征, 以期准确评价不同生长时期华山松碳储量的动态, 为进一步研究不同演替过程森林生态系统碳储量动态提供理论依据.

1 资料与方法

(i) 野外调查取样. 本实验所设置的 1 hm² 华山松样地(33.49°N, 111.94°E, 海拔 1508 m), 属于宝天曼暖温带落叶阔叶林 25 hm² 固定监测样地的卫星样地, 位于伏牛山脉宝天曼国家级自然保护区内, 地处暖温带向北亚热带过渡区. 区域内生境类型多样、物种丰富, 是生物资源的天然基因库. 宝天曼年均气温 15.1℃, 年均降水量 885.6 mm, 土壤可划分为山地棕壤、山地黄棕壤和山地褐土 3 种, 土壤 pH 为 6.5 左右.

本研究对 DBH (树高 1.3 m 处的胸径) ≥ 1 cm 的华山松进行每木尺检, 分别记录胸径、树高、冠幅、郁闭度. 按照样地调查资料, 将样地内华山松按 5 cm 划分径级, 在样地外每个径级选 2~4 株华山松钻取树芯, 在树高 1.3 m 处分别沿与向阳面山坡等高线方向平行和垂直 2 个方向钻取树芯, 每棵树钻取 2 个树芯, 共采集 8 个径级 27 棵华山松的树芯共 54 个.

测量树芯长度后装于特制塑料软管中, 贴好标签, 记录树高、胸径和样芯质量等信息.

(ii) 树木年轮样芯宽度测量与校正. 为防止时间过长引起树芯发霉, 将野外钻取的树芯带回实验室后从塑料管中倒出, 待其自然风干后对树芯重新测量长度, 以确定缩水率. 经测定, 树芯风干引起的干缩不大, 在生物量计算中未对此部分误差进行校正. 将自然风干后的树芯用白乳胶固定在带有凹槽的细木条上, 树芯黏牢后, 依次用砂粒分别为 240, 320, 500 目的砂纸打磨抛光, 直至显微镜下能够清晰地分辨细胞大小. 使用树木年轮测量仪 Lintab5 测量树芯的年轮宽度值, 精确到 0.001 mm, 用 COFFCHA 进行交叉定年检验以甄别系统定年错误和测量误差.

由于钻取的树芯轮宽值累加得到的模拟胸径值与实测的胸径值之间存在一定的偏差, 需要对树芯宽度进行校正^[5]. 校正公式为

$$\theta = \frac{(D_{bh} - D_i)}{2n}, \quad (1)$$

$$D_n = d_n \pm \theta, \quad (2)$$

θ 为校正值(mm), D_{bh} 为实测胸径值, d_n 为实测的树芯轮宽值, D_i 为轮宽值 d_n 累加得到的胸径值, n 为树龄, 树芯年轮宽度实际测量值加上 θ (可正、可负) 得到校正后的年轮宽度值 D_n . 累加树芯的年轮宽度值得到的胸径值没有包括树皮, 在计算胸径时将现存树皮厚度估算为胸径的一部分.

(iii) 华山松年龄的确定. 利用样地外所取得华山松树芯的年龄和树木胸径, 结合宝天曼国家级自然保护区保存的本样地附近解析木胸径处树盘数据, 建立华山松的年龄-胸径拟合方程, 进而利用所测量的样地内华山松的胸径值估算所有华山松的树龄. 不同树龄树木自身的生长趋势不同^[23], 导致不同树龄树木的树高和胸径增长量也不同, 研究华山松年均生长变化, 需了解各个时段华山松生长趋势. 根据华山松的生长规律, 胸径和树高的年均增长在 50 年前后达到第一个高峰, 胸径累计生长达到 13 cm 左右, 此后生长缓慢; 材积生长前 50 年渐快, 而后生长缓慢, 71~80 年出现年均生长第二个高峰, 胸径累计生长达到 25 cm 左右^[24]. 根据华山松的生长情况和样地的调查情况, 把宝天曼华山松按胸径分为 A (DBH≤15 cm), B (15 cm< DBH≤25 cm), C (DBH>25 cm) 3 个不同的径级. 样地的基本情况见表 1. 由表 1 中可以看出, 中径级华山松的密度要远高于小径级

和大径级华山松的密度.

(iv) 华山松胸径的累计生长. 树木年轮能够真实记录树木每一年的生长情况, 胸径处树芯年轮宽度的累加值可作为树木当年的胸径值.

$$D_{ic} = 2 \sum_{j=i}^n D_n, \quad (3)$$

式中 D_{ic} 为根据树芯年轮宽度模拟的树木胸径值, D_n 为校正后第 n 年的轮宽值, D_n 累加后乘以 2 即得到模拟的胸径值 D_{ic} , j 为样地每株树的初始年代, 因本文所用的样芯都是 2010 年钻取的, 故上式中 n 为 2010.

(v) 华山松生物量和碳储量动态变化计算. 华山松生物量(W)计算采用陈存根^[25]统计的全国华山松生物量异速生长方程. 根据文献资料收集到的秦岭-伏牛山地区华山松的异速生长方程计算单株地上和地下各器官生物量, 相加得到华山松单株生物量, 单株生物量累加得到样地内华山松的总生物量. 把得到的华山松树芯按 A (DBH≤15 cm), B (15 cm<DBH≤25 cm), C(DBH>25 cm) 3 个不同的径级进行整理, 将整理后的华山松树芯轮宽值加减 θ 修正后, 把相同径级的轮宽均值作为当年的标准轮宽值, 标准轮宽累加后得到的 D_{ic} 为第 n 年标准胸径值; 用实测的胸径、树高数据拟合胸径-树高方程, 把标准胸径值代入胸径-树高方程计算出标准树高; 把第 n 年标准胸径和标准树高代入表 2 中的华山松异速生长模型, 计算出树干、树枝、树叶、树根生物量, 各器官生物量相加为华山松单木第 n 年的生物量; 第 n 年生物量减去第 $n-1$ 年生物量为第 n 年生物量年增量, 再乘以碳素系数得到年增长碳储量. 不同径级年均碳储量增长量乘以华山松的株数, 得出不同径级碳储量的年增长总量.

树木年轮分析法能得到每株树逐年胸径值, 每年生物量和碳储量的增长量采用以下公式计算

$$W_n = \sum_{j=m}^i a \times (D^2 H)^b, \quad (4)$$

$$U_n = W_n - W_{n-1}, \quad (5)$$

$$C_n = U_n \times c, \quad (6)$$

$$BCD_i = C_n \times k, \quad (7)$$

a 和 b 为异速生长模型参数, n 为树龄, m 为不同器官, D 为胸径(包括实测胸径和模拟胸径), H 为树高(包括实测树高和模拟树高), W_n 为华山松 n 年树龄各器官生物量之和, 即华山松 n 树龄时的生物量; U_n 为 n 年树龄时生物量增长量, C_n 为华山松 n 树龄时的碳储量增长量, k 为华山松的株数, c 为通用碳素系数 0.5; 本研究基于 1 hm² 的华山松样地, 用 BCD_i (biomass carbon density)作为 1 hm² 样地内所有 k 株华山松在第 n 年增长的总碳储量, 进而计算样地的森林碳储量变化.

2 结果与分析

2.1 华山松生长动态变化

(i) 华山松树龄动态. 根据华山松样芯和树盘的年龄与利用轮宽值累加得到的胸径值, 建立华山松的胸径-年龄拟合方程(图 1). 把实际测量的树木胸径值代入图 1 华山松年龄-胸径拟合方程式估算出相应的树龄, 对实际树龄值与通过拟合方程得出的估算树龄值进行相关性检验, 结果达到显著相关 ($r=0.98$, $P<0.0001$). 通过胸径-树龄方程和样地内华山松的胸径值, 得到样地内华山松的年龄动态(图 2). 由表 1 和图 2 可知, 样地内华山松最小树龄为 29 年, 最大树龄 115 年, 平均树龄为 55 年; 华山松枯木 27 株, 其中, 小径级的华山松(DBH≤15 cm)枯木为 15 株, 占小径级总数的 11.6%; 中径级华山松(15 cm<DBH≤25 cm)的枯木为 12 株, 占中径级华山松总数的 6.3%.

由于样地内的幼苗和幼树没有调查, 样地内小径级华山松平均树龄为 37 年, 占样地内华山松总数 20.5%; 中径级华山松的树龄为 41~60 年, 占样地华山松总数 50.1%; 大径级华山松的平均树龄为 78 年, 约占样地华山松总数的 29.4%. 总的来看, 倒 J 型的年龄结构表明宝天曼华山松种群属于增长型种群.

(ii) 华山松胸径增长动态. 根据树木年轮宽度

表 1 宝天曼华山松调查样地的基本情况

径级	平均树龄(a)	树龄(a)	平均树高(m)	树高(m)	枯木(株)	密度(株/hm ²)
A (DBH≤15 cm)	37±3	29~40	8.2±2.7	1.9~14.5	15	81
B (15 cm<DBH≤25 cm)	50±5	41~60	13.3±2.32	7.0~16.5	12	193
C (DBH>25 cm)	78±15	61~115	15.6±1.38	10.0~18.0	0	103

表 2 华山松异速生长模型^{a)}

器官	异速生长模型	决定系数(R^2)	文献来源
树干	$0.01308(D^2H)^{1.0038}$	0.99	
树枝	$0.0055(D^2H)^{1.0439}$	0.97	[25]
树叶	$0.0011(D^2H)^{1.12566}$	0.92	[25]
树根	$0.0033(D^2H)^{1.0148}$	0.97	

a) D 为胸径, H 为树高

图 1 华山松胸径-年龄的拟合关系

图 2 宝天曼不同华山松的年龄动态

测读仪 Lintab5 测得华山松样芯的年轮宽度, 不同径级华山松的年轮宽度值分别见图 3. 由图 3 可知, 对 3 个径级华山松年轮宽度进行分析得出, 小径级 A, 中径级 B, 大径级 C 华山松的平均年轮宽度值不同, 分别为 1.504, 1.859, 1.802 mm. 而 3 个不同径级华山松的生长趋势相似, 在生命时期的初级阶段年轮宽度值增长较快, 其中, 中径级华山松平均年轮宽度增长最快, 年均轮宽值为 1.86 mm. 不同径级华山松在 1980 年以后生长都较慢, A, B, C 径级华山松胸径在 1980 年以后平均年轮宽度值分别是 1.35, 1.47, 0.80

mm. 总的来看, 中径级华山松胸径处于快速增长阶段, 大径级华山松增长缓慢.

(iii) 华山松树高生长动态. 根据实测的样地内华山松胸径和树高数据拟合得到华山松胸径-树高生长方程, 利用胸径-树龄方程估算出的当年胸径值以及相应的胸径-树高方程估算出当年的树高值, 以此来间接建立树龄与树高之间的动态关系. 对树高实测值和拟合值进行 T 检验(图 4), 研究发现, 华山松小径级 A, 中径级 B, 大径级 C 华山松实测平均树高分别为 8.2, 13.2, 15.59 m, 与拟合得到的 3 个生长时期的估测平均树高分别为 8.74, 12.83, 15.89 m 之间无显著差异, 表明生长方程可以用来模拟华山松单木树高生长过程.

2.2 华山松生物量和碳储量动态变化

不同径级宝天曼华山松碳储量年均增长变化见图 5. 由图 5 可以看出, 小径级华山松的碳储量随树龄的增加而增长, 年均碳储量增长量是 0.0685 t/hm²(图 5A). 中径级华山松年均碳储量增长量是 0.1535 t/hm², 随树龄和胸径的增加, 中径级华山松在 30 年左右年均碳储量增长最快, 随后又有所减慢(图 5B). 大径级华山松年均碳储量为 0.136 t/hm², 碳储量在 71~80 年达到高峰, 随着年龄增长出现减低的趋势(图 5C). 总的来看, 宝天曼华山松林以年均 0.2422 t/hm² 的速度增长.

利用实际测量的胸径和树高值代入异速生长方程(表 2)估算得到宝天曼华山松碳储量为 27.376 t/hm², 另一方面, 使用树木年轮法以轮宽累加值得到的胸径值, 并利用胸径-树高拟合方程计算得到树高值代入异速生长方程估算得到的碳储量, 累加得到宝天曼华山松地上总碳储量为 27.377 t/hm². 以上两种方法的计算结果基本一致.

研究表明, 华山松在 30 年左右碳储量增长加快然后减慢, 随后随树龄和胸径的增加而增加, 在 80 年左右达到高峰, 这种碳储量增长模式和华山松的生长趋势紧密相关. 华山松在 20 年后生长加快, 材积在 50 年前生长极其缓慢, 在 71~80 年达到第一次生长高峰^[24], 材积的快速增长有利于积累碳储量的积累.

不同径级华山松随年龄增长的碳储量 BCD_i (biomass carbon density) 动态变化见图 6. 由图 6 可以看出, 华山松胸径随着树龄的增长而增加, 碳密度受

图3 宝天曼不同径级华山松年均轮宽值
A, DBH≤15 cm; B, 15<DBH≤25 cm; C, DBH>25 cm

图4 宝天曼华山松的胸径-树高生长拟合关系

胸径影响出现随树龄增加的趋势,小径级华山松碳密度 BCD_i 为 2.757 t/hm^2 (图 6A),中径级华山松 BCD_i 为 9.211 t/hm^2 (图 6B);大径级华山松 BCD_i 为 15.408 t/hm^2 (图 6C).小径级、中径级、大径级华山松的 BCD_i 分别占样地内华山松总碳储量的 10.1%,

33.6%和 56.3 %.大径级华山松碳储量的比重最大,说明宝天曼华山松碳储量是一个随树龄的累积过程.

为了进一步探讨某一径级华山松碳密度增加量 BCD_i 在当年华山松林总碳储量 BCD_n 中的贡献,本文进一步比较了不同径级华山松碳储量 BCD_i/BCD_n 比值(图 7).研究发现,随着树龄的变化,小径级华山松的 BCD_i/BCD_n 从 0.11 增长到 0.17,1980 年后 BCD_i/BCD_n 都在 0.15 上下波动,并随树龄增长而增加,中径级华山松 BCD_i/BCD_n 从 0.19 增长到 0.43,大径级华山松 BCD_i/BCD_n 从 0.7 减少到 0.45.可见,随着树龄增加,华山松小树的胸径和树高增长缓慢,小径级华山松每年增加碳储量对华山松林的贡献率变化不大;中径级华山松的胸径和树高随着树龄的增大而增长较快,林分碳储量也随着林龄的增大而增加;大径级华山松随林龄增加,胸径和树高增长减缓,碳储量受树高和胸径的影响减少.1980 年后,大径级华山松和中径级华山松的 BCD_i/BCD_n 都在 0.45 上下波动,大、中径级华山松每年对华山松林碳贡献率相

图 5 宝天曼不同径级华山松随年龄增长的碳密度
BCD_i (biomass carbon density) 动态变化. A, DBH ≤ 15 cm; B, 15 < DBH ≤ 25 cm; C, DBH > 25 cm

图 6 不同生长时期华山松碳储量的累计增长量
A, DBH ≤ 15 cm; B, 15 < DBH ≤ 25 cm; C, DBH > 25 cm

近, 不同径级华山松的碳储量逐年平稳增加.

3 讨论

3.1 不同径级华山松生长变化特征

本文所调查的样地包括了宝天曼不同径级的华山松, 具有广泛的代表性, 能反映出华山松种群不同林龄的生长变化. 对于大多树种来说, 树木生长的径级结构与年龄结构是相对应的, 很多学者在进行树木生长研究时, 常采用树木径级结构代替树龄结构分析树木生长的年龄动态^[26]. 利用树木年轮研究华山松不同径级胸径年生长量的变化规律, 结果与同类研究结果相似^[27], 都表现为树木径向生长先增后

图7 宝天曼不同径级华山松 BCD_t/BCD_n 年态变化

A, B, C 表示不同径级, 其中 A, $DBH < 15$ cm; B, $15 < DBH < 25$ cm; C, $DBH > 25$ cm. BCD_t , 某一径级华山松某年的碳储量之和, BCD_n 同一径级华山松的年增长碳储量的总和

减、再缓慢减小的趋势^[28], 生长量的变化符合一般树木生长的“S”型变化规律^[29]. 这种趋势是由于胸径和树高生长在幼年时生长很快, 随着树龄增长, 胸径和树高生长有所减缓, 但依旧保持较快的增长趋势.

华山松幼苗幼树生长在树冠层下, 光照时间短, 生长缓慢; 中等径级华山松在树冠以上生长, 生境条件基本能得到满足, 生长速率快; 大径级华山松由于生理作用生长减慢^[24]. 在本研究中, 树木年轮分析仪能够很精确测量到每年的年轮宽度增长值, 而且定年准确, 测量的小径级华山松胸径生长量高于方艾等人^[24]研究的华山松胸径生长量, 可能的原因是: (1) 样地华山松为疏林, 透光、通风比较好; (2) 山地环境中树木的早期生长具有物种特异性, 不同物种或类群植物在同样环境下表现有差异^[30,31]; (3) 同一植物个体在不同发育阶段, 对于同样的环境变化也可能有不同乃至相反响应.

3.2 不同径级华山松生物量和碳储量研究

本研究中 1 hm^2 标准样地的华山松生物量为 54.75 t/hm^2 , 低于全国华山松平均生物量不同的估计值 $71.83^{[32]}$, $85.79^{[33]}$, $79.67 \text{ t/hm}^2^{[25]}$. 造成这种差距的原因可能有以下几个方面: (1) 森林中华山松密度不同, 本样地华山松密度为 377 株/hm^2 , 远低于以上研究者的 $957 \sim 1366 \text{ 株/hm}^2$; (2) 生物量估算方法不同, 方精云等人^[32]所用 BEF(生物量因子转化法), 马明等人^[33]所用标准木法; (3) 本样地平均为 55 年树龄, 高于陈存根^[25]的 30 年林龄华山松样地. 除去密度因素,

本实验样地华山松碳储量高于全国华山松平均生物量的估计值, 可能是由林龄原因导致生物量的这种差异. 越来越多研究认为, 森林中老龄林^[34]以及个体最大者^[35]控制着森林生物量和碳储量的变化.

以树木年代学为基础研究森林生物量和碳储量, 树木轮宽值和树高的增长是碳储量年增长量的决定因子, 胸径和树高拟合方程建立后, 只考虑轮宽值的增长, 单株华山松的碳储量随着林龄的增加而增加. 3 个径级中, 大径级华山松总体碳储量最高, 这能很好地解释为什么森林生态系统中老龄树仍然起着碳汇的作用^[36-38]. 大径级华山松和中径级华山松的碳储量年增加量在 1980 年后处于一个相等水平, 而小径级华山松碳储量年增量一直处于一个较低水平, 产生这种情况的情况有: (1) 大径级华山松在 71~80 年达到第 2 个生理生长高峰, 达到 80 年后的 10 年间生理生长下降导致碳储量下降. 中、小径级的华山松在此 10 年间增长迅速, 生物量和碳储量在这一时期迅速增长, 大径级华山松碳储量增长下降. (2) 中、小径级树木的死亡减少了碳储量在 2000~2010 年间的增加, 导致中径级和小径级华山松碳储量处于波动水平. (3) 水的压强限制了树木的最大生长高度, 一些个体较大的树其树高被限制生长以后, 树木轮宽值的增长成为碳储量增长的主要限制因子. 水的压强限制了树的最大高度假说(the hydraulic limitation hypothesis)^[39]得到了一些实例的支持^[40,41].

树木年轮法在准确量化森林不同生长时期历史碳储量研究时能够结合不同林龄之间树木径向生长差异; 在对同一树种的碳储量进行深入研究时, 能够考虑到同一树种不同地理种源、不同发育阶段、不同自然地带的碳储量差异, 以及建立不同生物量树种权重指标体系, 可以实现对生物量较为精确的估测^[42]. Keeling 等人^[43]还结合树种生理学特性(耐荫性)对于碳储量的影响进行了研究, 结果表明喜光性树种可以获取更多碳储量.

4 结论

本文采用宝天曼国家级自然保护区 3 个不同径级华山松树芯样本, 利用树木年轮宽度资料分析了不同径级华山松的碳储量动态变化. 研究发现小径级、中径级、大径级华山松碳储量分别为 2.757 , 9.211 , 15.408 t/hm^2 ; 虽然中径级华山松林分密度和径向生长量最大, 但其碳储量年增长量和总量都低于大径

级华山松。结果说明,在宝天曼华山松林中最大径级的华山松控制着华山松林碳储量的增长;中径级华山松 6.3%的死亡率使得这一径级碳储量增长受到限制;小径级华山松林龄较小,相对于中、大径级的华

山松没有竞争优势,其年均生物量稳速增加;随着林龄的增长,宝天曼华山松林碳汇作用会越来越高。研究表明利用树木年代学知识能较好地探讨宝天曼华山松生长趋势和评估碳储量的动态变化。

致谢 本研究得到宝天曼国家级自然保护区管理局对野外工作的支持,中国科学院植物研究所张齐兵研究员和邱红岩老师以及河南大学彭剑峰副教授对实验室研究工作的指导和支持,作者在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use, vol. 4. National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan. 2006
- 2 Emily M, Payen R, Rohweder M, et al. Pilot Analysis of Global Ecosystem: Forest Ecosystems. World Resource Institute, 2000
- 3 张远东, 刘彦春, 刘世荣, 等. 基于年轮分析的不同恢复途径下森林乔木层生物量和蓄积量的动态变化. 植物生态学报, 2012, 36: 117–125
- 4 Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292: 2320–2322
- 5 Liu Y F, Yu G R, Wen X F, et al. Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from sub-tropical plantation coniferous ecosystem. Sci China Ser D Earth Sci, 2006, 49(Suppl): 99–109
- 6 Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393: 249–252
- 7 Gong P. Progression of RS-ecometrics. J Nat Resour, 1999, 14: 51–54
- 8 Bouriaud O, Brdda N, Dupouey J L, et al. Is ring width a reliable proxy for stem-biomass increment? A case study in European beech. Can J Forest Res, 2005, 35: 2920–2933
- 9 Fritts H C. Reconstruction Large-Scale Climatic Patterns from Tree-Ring Data. Tucson, USA: The University of Arizona Press, 1991
- 10 Brien R J W, Zuidema P A. The use of tree rings in tropical forest management: Projecting timber yields of four Bolivian tree species. Forest Ecol Manag, 2006, 226: 256–267
- 11 Hasenaur H, Nemani R R, Schadauer K, et al. Forest growth response to hanging climate between 1961 and 1990 in Austria. Forest Ecol Manag, 1999, 122: 209–219
- 12 Hunt E R J, Martin F, Running S. Simulating the effects of climatic variation on stem carbon accumulation of a Pinus ponderosa stand: Comparison with annual growth increment data. Tree Physiol, 1991, 9: 161–171
- 13 Krakauer N Y, Randerson J T. Do volcanic eruptions enhance or diminish net primary production? Evidence from tree rings. Glob Biogeochem Cycles, 2003, 17: 1118
- 14 Cheikh M, Sophan C, Bienvenu S, et al. Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa. Dendrochronologia, 2013, 31: 45–51
- 15 邵全琴, 杨海军, 刘纪远, 等. 基于树木年轮信息的江西千烟洲人工林碳蓄积分析. 地理学报, 2009, 64: 69–83
- 16 Liu Y, Zhang Y, Liu S. Aboveground carbon stock evaluation with different restoration approaches using tree ring chronosequences in Southwest China. Forest Ecol Manag, 2012, 263: 39–46
- 17 张远东, 刘彦春, 刘世荣, 等. 基于年轮分析的不同恢复途径下森林乔木层生物量和蓄积量的动态变化. 植物生态学报, 2012, 36: 117–125
- 18 Aide T M, Zimmerman J K, Pascarella J B, et al. Forest regeneration in a chronosequence of tropical abandoned pastures: Implications for restoration ecology. Restorat Ecol, 2000, 8: 328–338
- 19 Chazdon R L, Letcher S G, Breugel V M, et al. Rates of change in tree communities of secondary neotropical forests following major disturbances. Phil Transact R Soc Lond Ser B Biol Sci, 2007, 362: 273–289
- 20 Saldarriaga J G, West D C, Tharp M L, et al. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. J Ecol, 1988, 76: 938–958
- 21 Pumijumnong N. Dendrochronology in Southeast Asia. Trees, 2013, 27: 343–358
- 22 代力民, 孙伟中, 邓红兵, 等. 长白山北坡阔叶红松林群落主要树种的年龄结构研究. 林业科学, 2002, 38: 73–77

- 23 Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976
- 24 方艾. 华山松林. 见:《河南森林》编辑委员会, 编. 河南森林. 北京: 中国林业出版社, 2000
- 25 陈存根. 秦岭华山松林生产力的研究华山松林乔木层的生产量. 西北林学院学报, 1984, 1: 1-18
- 26 洪伟, 王新功, 显承祯, 等. 濒危植物南方红豆杉种群生命表及谱分析. 应用生态学报, 2004, 15: 1109-1112
- 27 封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等. 基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究. 生态学报, 2012, 32: 1450-1457
- 28 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990
- 29 赵志江, 谭留夷, 宁佐梅, 等. 王朗自然保护区岷江冷杉(*Abies faxoniana*)树干解析研究. 西北林学院学报, 2012, 27: 163-168
- 30 储子彦. 亚热带 39 种植物的叶碳效率对环境因子的响应研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2008
- 31 Bin Y, Lin G J, Li B H, et al. Seedling recruitment patterns in a 20-ha subtropical forest plot: Hints for niche-based processes and negative density dependence. *Eur J Forest Res*, 2012, 131: 453-463
- 32 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16: 497-508
- 33 马明, 王得祥, 刘玉民. 秦岭天然华山松林碳素空间分布规律及其动态变化. 林业资源管理, 2008, 5: 75-78
- 34 Liu Y, Yu G, Wang Q, et al. How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests. *Glob Ecol Biogeogr*, 2014, 23: 323-333
- 35 Stegen J C, Swenson N G, Enquist B J, et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. *Glob Ecol Biogeogr*, 2011, 20: 744-754
- 36 Phillips O L, Malhi Y, Higuchi N, et al. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science*, 1998, 282: 439-442
- 37 Luyssaert S, Schulze E D, Börner A, et al. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 2008, 455: 213-215
- 38 Lewis S L, Lopez-Gonzalez G, Sonké B, et al. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 2009, 457: 1003-1006
- 39 Midgley J J. Is bigger better in plants? The hydraulic costs of increasing size in trees. *Trends Ecol Evol*, 2003, 18: 5-6
- 40 Koch G W, Sillett S C, Jennings G M, et al. The limits to tree height. *Nature*, 2004, 428: 851-854
- 41 Ryan M G, Phillips N, Bond B J. The hydraulic limitation hypothesis revisited. *Plant Cell Environ*, 2006, 29: 367-381
- 42 Naidu S L, Delucia E H, Thomas R B. Contrasting patterns of biomass allocation in dominant and suppressed loblolly pine. *J Forest Res*, 1998, 28: 1116-1124
- 43 Keeling H C, Baker T R, Martinez R V, et al. Contrasting patterns of diameter and biomass increment across tree functional groups in Amazonian forests. *Oecologia*, 2008, 158: 521-534

Carbon storage dynamics of *Pinus armandii* forest at different diameter levels based on tree ring data in the Baotianman National Nature Reserve, central China

WANG Ting¹, REN SiYuan¹, CHEN Yun², YUAN ZhiLiang², LI LuXin¹, PAN Na¹ & YE YongZhong²

¹ College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

² College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Based on tree-ring analysis, *Pinus armandii* trees were divided into three classes (A, DBH≤15 cm; B, 15 cm<DBH≤25 cm; C, DBH>25 cm) to study carbon storage dynamics of *Pinus armandii* populations in the Baotianman National Nature Reserve. Comparison of these three diameter classes revealed three major findings. (1) The carbon storage of *P. armandii* trees in small DBH class A, intermediate class B and large class C were 2.757, 9.211 and 15.408 t/hm², respectively, with corresponding annual carbon increments of 0.0685, 0.1535 and 0.136 t/hm². (2) The intermediate class (15 cm<DBH≤25 cm) had the highest stand density, diameter increment and carbon storage among the three DBH classes in the *P. armandii* forest. (3) Trees in the large DBH class (DBH>25 cm) had the greatest contribution to total carbon storage of the *P. armandii* forest. Tree mortality was the main factor limiting carbon storage within small and intermediate DBH class *P. armandii* trees, whereas physiological growth was the restrictive factor for large DBH class trees. Our results demonstrate that dendrochronological analysis is an important method to evaluate growth trends and to assess the carbon storage dynamics of the *P. armandii* forest in the Baotianman National Nature Reserve.

***Pinus armandii*, tree ring, DBH class, carbon storage, dynamics**

doi: 10.1360/N972014-00403