

青海省森林生态系统植被固碳现状研究

胡雷¹, 王长庭^{1*}, 王根绪², 刘伟³, 阿的鲁骥¹

(1. 西南民族大学生命科学与技术学院, 四川成都 610041; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810008)

摘要: 科学评估区域森林碳储量动态、固碳现状及其增汇潜力对理解陆地生态系统碳循环以及源汇功能具有重要意义。利用青海省第三次(1989-1993年)至第六次(2004-2008年)森林资源清查资料, 以及不同树种生物量和蓄积量之间的线性关系, 对青海省近19年来森林碳储量进行了求和估算。结果表明: ①青海省森林面积从1989年的 $246.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到2008年的 $355.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。②青海省4次森林资源清查中森林植被整体碳储量从1989年的 $814.34 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到2008年的 $1118.26 \times 10^4 \text{ t}$, 增加了 $303.92 \times 10^4 \text{ t}$, 年均增加(19a) $159.96 \times 10^4 \text{ t}$, 年均增长率1.68%, 表明19年间青海森林植被碳汇作用不断增强, 储碳能力将随森林面积的增加逐渐增加, 青海省的森林是 CO_2 的“汇”。③青海省1989-2008年间主要森林类型碳增汇量为柏木>桦木>杨树>云杉, 可见这几类林分类型在全省森林植被碳汇功能中占有重要的地位。如果对现有森林进行更好地抚育和管理, 青海省森林作为 CO_2 “汇”的潜力很大。

关键词: 森林生物量; 森林碳储量; 固碳现状; 青海省

中图分类号: S718.5 文献标识码: A

Carbon Sequestration of Forest Ecosystem Vegetation in Qinghai Province

HU Lei¹, WANG Chang-ting^{1*}, WANG Gen-xu², LIU Wei³, ADE Lu-ji¹

(1. College of Life Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Sichuan Chengdu 610041, China; 2. Institute of Hazards and Environment, Chinese Academic of Sciences, Sichuan Chengdu 610041, China; 3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academic of Sciences, Qinghai Xining 810008, China)

Abstract: To evaluate forest carbon stock dynamics, carbon sequestration and carbon sink capacity of regional forest scientifically is very important to understand terrestrial ecosystem carbon cycle and carbon source and sink function. Based on the national forest investigated data from 1989 to 2008, the carbon storage of forests in Qinghai province was estimated by the linear relationship between stand biomass and volume. The results showed that (i) The forest area increased from $246.50 \times 10^4 \text{ hm}^2$ in 1989 to $355.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$ in 2008. (ii) The total carbon storage of forest vegetation in Qinghai increased $303.92 \times 10^4 \text{ t}$ from $814.34 \times 10^4 \text{ t}$ in 1989 to $1118.26 \times 10^4 \text{ t}$ in 2008 and by 1.68% annually during the study period, which indicated that the forests in Qinghai province played a role as a sink of atmospheric carbon dioxide, carbon sink and sequestration was strengthened with forest area increasing during the last 19 years. (iii) Carbon sink increments of main forest types ranged as *Cypress* > *Betula* > *Populus* > *Picea*, which indicated that these several kinds of forests played an important role in carbon sink function of Qinghai forest vegetation. If the current forest was managed well, it would become a huge potential carbon sink in the future.

Key words: Forest biomass; Forest carbon stock; Carbon sequestration status; Qinghai province

哥本哈根气候大会昭示着气候变暖问题已严重威胁到人类的生存和发展^[1]。气候变暖与陆地生

态系统碳循环动态及其反馈效应密切相关, 森林作为大气 CO_2 最大的陆地碳库, 在陆地碳循环中占主导地位, 其碳汇功能对碳收支平衡起着不可替代的作用^[2-4]。有研究表明, 森林植物在其生长过程中可通过同化作用吸收大气中的 CO_2 , 以生物量的形式将其固定在植物体和土壤中, 使森林成为陆地生态系统最重要的碳汇或碳源^[5]。全球的森林面积只占土地面积的27.6%, 但森林植被碳储量却占全球植被的77.0%, 森林土壤的碳储量约占全球土壤

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项-应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050207); 国家自然科学基金面上项目(31370542); 西南民族大学研究生创新型项目(CX2013SP79); 西南民族大学研究生学位点建设项目(2011XWD-S071012)

作者简介: 胡雷(1991-), 男, 河南舞阳人, 在读硕士, E-mail: hl007873@sohu.com, *为通讯作者; E-mail: wangct6@163.com。

的 39.0 %; 单位面积森林生态系统碳储量是农地的 1.9 ~ 5.0 倍^[6]。森林生态系统在全球碳循环中具有重要的意义, 主要表现在: ①森林是陆地生态系统中最大的碳库, 贮存了陆地生态系统总碳库的 56 %; ②森林单位面积的碳贮存密度很大, 达到 198 mg · hm⁻²^[7], 森林面积的变化直接影响到陆地生态系统的碳源碳汇作用; ③森林植被的碳积累速度快, 即森林固定大气 CO₂ 的速率大^[8]。为此森林生态系统的固碳措施, 包括造林、森林采伐和再造林, 已经被纳入到旨在减少全球大气 CO₂ 排放的《京都议定书》中。世界各国科学家都在不断探讨和估算全球和区域的森林生态系统的固碳能力。

中国森林植被的固碳能力一直受到国际社会的高度关注, 目前已经有不同的作者对中国森林植被的碳贮量^[9-12]、固碳现状和潜力^[13-17]进行了估算, 但这些研究大都基于 1998 年前的全国森林普查资料。近年来, 随着科技和政策投入在全球区域碳循环方面的增加, 将有助于推动中国碳平衡的研究^[18]。加之一系列新的林业举措, 如森林禁采和限采政策的推行和六大林业工程(天然林资源保护工程、退耕还林工程、三北长江流域等重点防护林建设工程、环北京地区防沙治沙工程、全国野生动植物保护及自然保护区建设工程和重点地区速生丰产用材林基地建设工程)^[19]的展开, 对森林资源的开发强度有所减缓, 森林的面积逐步扩大。中国的森林覆盖率由 1998 年的 16.55 % 增加到 2003 年的 18.21 %^[19], 森林蓄积量增加 13 × 10⁹ m³^[20]。这些变化都会影响到森林生态系统的碳源碳汇特征和固碳潜力。

作为整个森林生态系统运行的能量基础和营养物质来源, 森林生物量大小和变化是森林植被自身的生物学、生态学特征及其它自然因素与区域人类活动综合作用的表现, 是度量森林生态系统结构和功能变化的重要指标之一, 并已成为森林固碳能力的重要标志, 以及评估森林碳收支的重要参数^[21]。因此, 准确估算区域森林的生物量对研究区域陆地生态系统的生产力、碳循环、全球气候变化具有十分重要的意义。我国大区域森林的生物量研究始于 20 世纪 90 年代末期, 许多学者在这方面进行了研究, 先后建立了主要树种的生物量测定相对生长方程, 估算了它们的生物量与生产力, 初步总结了全国不同类型森林的生物量与生产力及其格局^[15, 22-26]。基于森林资源清查数据进行大区域森林生物量的估算一直是人们关注的焦点, 现已成为区域森林植物生物量和碳储量估测的发展趋势。近年来, 国内较多学者基于区域性的森林资源清查资料, 开展了不

同区域范围内的森林生物量和碳储量研究工作^[27-33], 为评价区域尺度的生态质量和研究我国森林生态系统的碳汇能力提供了重要参考。青海省至 2008 年已完成第 7 次森林资源清查, 并积累了多期可比性强的清查数据, 这为该区森林植被碳动态的研究提供了重要条件。笔者利用青海省 1989 - 1993、1994 - 1998、1999 - 2003 和 2004 - 2008 年森林资源清查数据, 对全省森林植被碳储量动态变化、固碳潜力进行了初步的评述和对比分析, 旨在为区域碳循环研究积累基础资料, 对于今后开展全省森林植被 CDM (Clean Development Mechanism) 碳汇功能评价和森林碳生态效益补偿机制的建立, 同时也为全球变暖背景下制定减排增汇的相关区域环境决策提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况

青海省位于青藏高原的东北部(31°39' ~ 39°19' N, 89°35' ~ 103°4' E), 东西长约 1200 km, 南北宽约 800 km, 青海省土地总面积 7215.24 × 10⁴ hm²。其中林地面积 634.00 × 10⁴ hm², 占 8.79 %; 森林面积 329.56 × 10⁴ hm², 占林地面积 51.98 %, 森林覆盖率 4.57 %。燕山运动奠定地形复杂多样, 高山、丘陵、河谷、盆地交错分布, 平均海拔 3000 m 以上, 属典型高原大陆性气候。年均气温 -3.7 ~ 6.0 °C, 年日照 2340 ~ 3550 h, 年降水量 16.7 ~ 776.1 mm (大部 400 mm 以下), 年蒸发量 1118.4 ~ 3536.2 mm^[34]。森林植被分布于东经 96° 以东, 主要江河及其支流的河谷两岸, 森林分布海拔大多在 2500 ~ 4200 m, 以寒温带常绿针叶林亚型为主, 其次为落叶林植被型(多为原始林破坏后的次生类型)。植被地域上跨青藏高原、温带荒漠和温带草原 3 个植被区, 具有高寒和旱生的特点, 以寒温性常绿针叶林为主, 常见的针叶树种有云杉(*Picea*)、圆柏(*Cypress*)等, 阔叶树种有杨树(*Populus*)、桦木(*Betula*)等, 灌木有金露梅(*Potentillafruticosa*)、杜鹃(*Rhododendron*)、锦鸡儿(*Caraganasinica*)、高山柳(*Salix cupularis*)等^[34-35]。

1.2 研究方法

1.2.1 森林生物量测定 本研究所使用的森林资源数据是 1989 - 1993、1994 - 1998、1999 - 2003 和 2004 - 2008 年 4 次青海省森林资源连续清查资料。由于森林资源清查资料提供了林分各优势树种各龄组的面积和蓄积。森林蓄积量是森林生长的立地条件、气候条件和森林年龄及其他各因素的综合反映, 大量森林实测生物量与蓄积量的关系研究表明, 在

表 1 不同林分类型生物量与蓄积量回归方程

Table 1 The regression equation (RQ) between biomass and volume with different forests

林分类型 Type of forest stands	生物量(B)-蓄积量(V) 回归方程 RG of biomass-volume	样本数 Number of samples	相关系数 Correlation coefficient
落叶松 <i>Larix</i>	$B = 0.9671V + 5.7598$	13	0.99
云杉 <i>Picea</i>	$B = 0.4642V + 47.499$	19	0.99
冷杉 <i>Abies</i>	$B = 0.4642V + 47.499$	19	0.99
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	$B = 0.7554V + 5.0928$	90	0.98
华山松 <i>P. armandi</i>	$B = 0.5856V + 18.7435$	10	0.95
柏木 <i>Cypress</i>	$B = 0.6129V + 26.1451$	19	0.98
栎类 <i>Quercus</i>	$B = 1.3288V - 3.8999$	6	1.00
杨树 <i>Populus</i>	$B = 0.4754V + 30.6034$	16	0.93
桦木 <i>Betula</i>	$B = 0.9644V + 0.8485$	6	0.98
软阔类 <i>Softwood</i>	$B = 1.1595V - 1.5306^*$	50	0.93

注: 罗天祥等^[23](1998)。

不同林分类型中二者均存在着良好的回归关系^[10, 36-37]因而,材积源生物量法弥补了平均生物量法所带来的一些人为差异,基本上能很好地体现实际情况^[15]。本文采用方精云等^[9, 24, 38]、刘国华等^[15]所建立的各个林分生物量与蓄积量之间的回归关系(表1)来估测青海省森林生物量。

1.2.2 森林植被碳储量计算 计算区域尺度森林生物量方法为以下3种,即平均生物量法、平均换算因子法和换算因子连续法(Biomass expansion factor, BEF)^[39-40]。①平均生物量法利用野外实测数据获得的平均生物量乘以对应类型森林的面积即为该区域森林生态系统的总生物量。该方法也在国际生物学计划(IBP) 期间被广泛应用^[41-42]。②平均换算因子法利用生物量换算因子的平均值乘以该森林类型的总蓄积,得到该类型森林的总生物量。在研究国家尺度的森林生物量时大多采用平均的 BEF 值以及森林清查资料所提供的森林总面积和蓄积量等数据^[38, 43]。③换算因子连续函数法研究表明,同一森林类型的林分生物量与木材材积比值会随着林龄、立地条件、个体密度和林分状况等因子发生变化。因此,换算因子连续法对于估算国家或者区域尺度的森林生物量有更准确的结果^[44-45]。虽然 Brown 和 Lugo 等人利用幂指数函数来表示 BEF 与林分材积(x)的关系($BEF = ax^{-b}$)^[42, 46],但是该方程存在严重的数学推理问题。因此,方精云等人用倒数方程来弥补这一缺陷,即 BEF 与林分材积(x)的关系可以用如下方程表示: $BEF = a + \frac{b}{x}$ 式中 a 和 b 均为常数。当材积很大时, BEF 趋向恒定值 a ; 当材积很小时, BEF 很大^[43]。

森林植被碳储量由乔木层、灌木层、草本层和枯

枝落叶层的碳储量组成。森林植被碳储量为森林生物量乘以转换系数:

$$T_c = B_i \times C_c \quad (1)$$

$$C_{Fi} = C_{Ti} + C_{Si} \quad (2)$$

式中: T_c 为某一层植被碳储量, B_i 和 C_c 分别为对应层的生物量和碳含量; C_{Fi} 表示森林生态系统 i 的总碳储量($t \cdot C \cdot hm^2$); C_{Ti} 和 C_{Si} 分别表示乔木层、林下植被(灌木层、草本层、凋落物和枯死倒木)^[9, 47]。

本文采用目前国际上常用的转换系数 0.5(即每克干物质的碳储量)^[46, 48]; 本文计算的森林植被碳储量指乔木层碳储量,未包括灌木层、草本层和枯枝落叶层的碳储量。另外,本研究中的碳增汇量是指生物量增加部分的碳汇储量,碳密度则是碳储量与森林面积的比值。

2 结果与分析

2.1 各时期青海森林植被面积、碳储量和碳密度

图 1 显示,青海森林植被碳密度在 19 a 间没有发生显著性变化,而森林植被面积逐年增加,在 2008 年增加到了 $35.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$,森林覆盖率达到 4.57%。从 4 次森林清查(1989-1993、1994-1998、1999-2003 和 2004-2008 年)结果可知,每 5 a 森林植被碳储量分别增加 97.18×10^4 、 109.04×10^4 和 $97.70 \times 10^4 \text{ t}$; 从 1989 年到 2008 年的 19 a 中共增加 $303.92 \times 10^4 \text{ t}$,年均增加(19a) 159961.05 t ,年均增长率 1.68%。由此可见,青海森林植被起着碳汇的作用。青海森林植被的这种变化趋势与同时期中国森林植被碳储量的总体变化趋势相同,20 世纪 70 年代末以来,中国森林植被起着碳汇作用,且碳汇功能越来越强^[49]。

青海森林不同林分类型碳密度、面积和碳储量

的变化与相对应的青海森林总指标呈现相似趋势。在植被碳密度计算中发现,冷杉、云杉和松树的碳密度较大,均超过了 0.10 t/hm^2 ,其中冷杉碳密度从 1989 年的 $0.16655569 \text{ t/hm}^2$ 增加到 2008 年的 $0.22354808 \text{ t/hm}^2$,增长了 34.2% ,增长幅度巨大,而云杉和冷杉虽然有增加,但增长幅度较小($<1\%$)。在植被面积调查中,柏木林和云杉林所占森林总面积比例最高,四次森林普查结果显示,二者面积之和均达到了青海省森林总植被面积的 68% 以上(图 1)。青海省 1993-2008 年间,主要森林类型植被整体碳储量呈增加趋势,共增加 $303.92 \times 10^4 \text{ t}$,碳储量年增加 1.68% 。其中,冷杉碳储量呈下降趋势,而松树(落叶松、油松和华山松)、柏木、栎类、杨树、桦木、软阔类等碳储量呈上升趋势。

青海省 1989-1993 年间森林植被整体碳储量为 $814.34 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中云杉林碳储量最高,达 $394.31 \times 10^4 \text{ t}$,占森林植被整体碳储量的 48.42% ,其它森林类型碳储量特征表现为柏木 > 桦木 > 杨树 > 松树 > 冷杉,其碳储量比例分别为 27.96% 、 15.37% 、 5.49% 、 2.02% 、 0.74% ;青海省 1994-1998 年间森林植被整体碳储量为 $911.52 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中云杉碳储量最高,达 $408.04 \times 10^4 \text{ t}$,占森林植被整体碳储量的 44.76% ,其他森林类型碳储量特征表现为柏木 > 桦木 > 杨树 > 松树 > 冷杉,其碳储量比例分别为 29.64% 、 16.40% 、 6.27% 、 2.24% 、 0.68% ;青海省 1999-2003 年间森林植被整体碳储量为 $1020.56 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中云杉碳储量最高,达 $407.89 \times$

10^4 t ,占森林植被整体碳储量的 39.97% ,其他森林类型碳储量特征表现为柏木 > 桦木 > 杨树 > 松树 > 冷杉,其碳储量比例分别为 30.60% 、 18.21% 、 8.01% 、 2.40% 、 0.35% ;青海省 2004-2008 年间森林植被整体碳储量为 $1118.26 \times 10^4 \text{ t}$,其中云杉碳储量最高,达 $434.343 \times 10^4 \text{ t}$,占森林植被整体碳储量的 38.84% ,其他森林类型碳储量特征表现为柏木 > 桦木 > 杨树 > 松树 > 冷杉,其碳储量比例分别为 30.14% 、 18.81% 、 7.91% 、 2.26% 、 0.50% (图 1)。

2.2 青海省主要林分类型碳增汇潜力

近 20 a 来,青海省不同林分碳储量年平均变化速率表现出显著性差异,其中落叶松碳储量增长速率最快,达到 4.979% ,而冷杉平均增长速率呈现负增长,为 -0.376% (图 2)。杨树、桦木和柏木的年平均增长速率分别为 3.659% 、 2.769% 和 2.261% 。从 1989 年至 2008 年,其蓄积量增长量分别为 184.2×10^4 、 176.6×10^4 和 $393.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,生物量增长量分别为 8.75×10^4 、 170.31×10^4 和 $241.05 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。占青海森林面积比例约 30% ,碳储量总量占 38% 以上的青海云杉,碳储量的年平均增长速率仅为 0.510% 。从 1989 年至 2008 年 19 a 间,青海云杉蓄积量($172.5 \times 10^4 \text{ m}^3$)和生物量($80.08 \times 10^4 \text{ t}$)增长潜力分别与桦木($176.6 \times 10^4 \text{ m}^3$)和杨树($87.55 \times 10^4 \text{ t}$)持平,碳储量增加仅为 $40.40 \times 10^4 \text{ t}$ (图 2 表 2)。

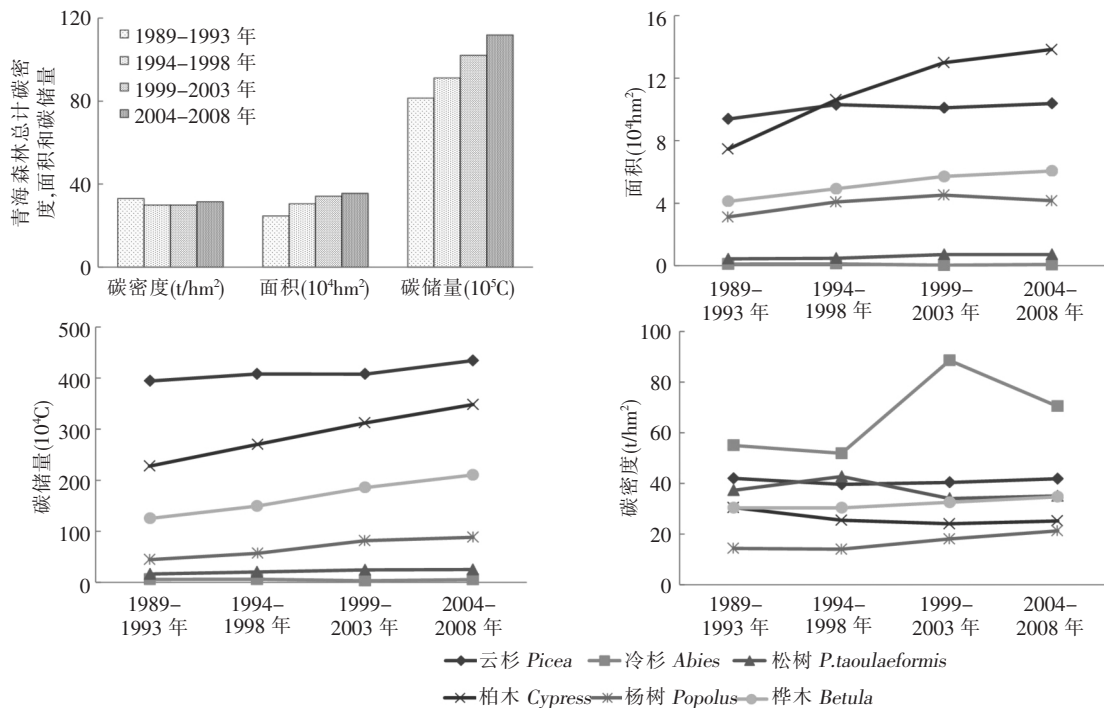


图 1 青海省不同时期各林分类型碳储量

Fig. 1 Carbon stock of the main forests stands in different periods in Qinghai

表 2 青海省 1989-2008 年间主要林分类型碳增汇潜力

Table 2 Capacity of raising carbon sink of main forest type in Qinghai during 1989-2008

森林类型 Types of forest	蓄积量(m ³) Volume	生物量(t) Biomass	碳增汇量(t) Carbon increment stock
柏木 <i>Cypress</i>	3932600	2410316.69	1205158.34
桦木 <i>Betula</i>	1766000	1703131.25	851565.62
杨树 <i>Populus</i>	1841500	875479.70	437739.85
云杉 <i>Picea</i>	1725000	800792.50	400396.25
合计 Total	9265100	5789720.14	2894860.06

从 1989 年到 2008 年云杉林、柏木林、桦木林及杨树林的碳储量共增加 289.48×10^4 t, 占全省森林植被碳增量的 95.25%, 青海省 1989-2008 年间森林植被总体碳增汇量表现为, 柏木 > 桦木 > 杨树 > 云杉(表 2), 表明这几种森林植被类型在全省森林植被中占有重要的地位。因此, 这些森林植被类型碳的动态变化将极大地影响到全省整个森林的碳源汇功能。

3 讨论与结论

3.1 不同时期青海省森林植被碳储量与增汇潜力

本研究表明, 青海森林植被碳储量以 1.68% 的年均增长率, 从 1989 年到 2008 年增加了 303.92×10^4 t, 与全国年均增长率(1.89%)^[50] 相近。同时, 青海森林植被面积 1989-2008(19a) 年间逐渐增加, 从 1989 年的 24.65×10^4 hm² 增加到 2008 年的 35.50×10^4 hm²。这种变化趋势意味着青海森林植被碳汇作用不断增强, 储碳能力将随森林面积的增加逐渐增加。结合青海省实施的天然林资源保护工程、退耕还林(草)工程进行森林植被保护、退化森林生态系统恢复重建, 能显著增加青海省森林植被的碳汇功能, 其固碳能力将不断提高。特别是以幼林龄和中龄林为主的林地, 如果加以更好地抚育和管理, 森林植被的固碳潜力仍有很大的增长空间^[20, 51]。

3.2 青海省森林碳增汇管理和发展对策

青海省森林生态系统功能中等偏下, 生态功能指数为 0.4296。生态功能等级为优、中、差的森林面积分别为 1.80×10^4 、 234.17×10^4 和 93.59×10^4 hm², 分别占 0.55%、71.05% 和 28.40%。处于健康状态的森林面积占 96.85%, 处于亚健康状态的森林面积占 1.60%, 中等健康水平的森林面积占 1.42%, 处于不健康状态的森林面积占 0.13%。总体来看, 青海省森林资源总量相对不足, 生态环境仍然比较脆弱; 林木消耗量居高不下, 超额采伐依然

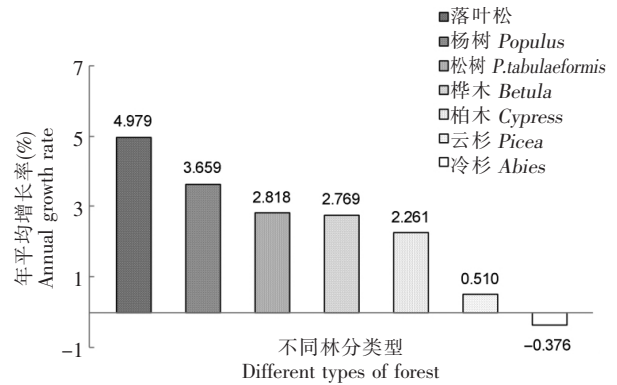


图 2 青海省不同林分植被碳储量年平均变化调率

Fig. 2 Annual growth rate of different types of forest in Qinghai

存在; 造林成林率较低, 人工林资源增长较慢。因此, 制定针对青海省森林生态系统碳汇管理和发展对策, 发挥森林生态系统涵养水源、调节气候等一系列生态服务功能对与维护和改善青海省的生态状况有极为重要的作用。

在森林生态系统中, 不同林分类型对其立地条件土壤养分有不同影响, 云杉林土壤碳含量最高, 松树林含量最低^[52]; 不同林分类型显著影响对地下生态系统功能微生物多样性^[53], 土壤微生物的群落结构水平可以反应土壤生态系统的质量和健康水平^[54]。青海省不同林分条件对土壤养分的积累、分布和改良的影响存在差异, 云杉林作用最大, 白桦和云杉混交林作用次之; 而对于土壤微生物群落代谢活性和代谢多样性的影响, 山杨林影响最高, 云杉林作用较低^[55]。因此, 碳储量年平均增长速率较大的林分类型, 如杨树(3.659%)、桦木(2.769%)和柏木(2.261%), 能够促进土壤微生物群落的代谢活性和代谢多样性, 进而分解更多的土壤养分, 释放到土壤中被地上植被吸收获得较高的碳储量。这一循环模式显著增加了林分的碳储量却使植被立地条件恶化, 间接影响了土壤养分的积累和改良。落叶松具有最高的碳储量年平均增长速率(4.979%), 而对土壤养分的积累和改良效果低于云杉林高于杨树^[55-56], 因此, 落叶松具有较为持久和高效的碳储量潜力。

在制定针对青海省森林碳汇发展对策时, 笔者认为可以考虑以下几点建议: ①云杉林具有较大的碳储量现状, 应该加以重点保护, 使其能够保持现有的增长速率, 将会对青海省森林碳储量有益影响; ②柏木、桦木和杨树因其具有较高的碳储量增长速率, 从森林的碳汇增长上考虑, 应该需要适当的增加这 3 种林分类型的面积, 但考虑到其对立地土壤养分的“疯狂的掠夺”, 为了森林的可持续发展, 需要寻找一个平衡点, 这有待进一步研究; ③落叶松的碳储

量年平均增加速率达到了 4.979% ,可以考虑适当增加落叶松林分的比重,以使青海省森林发挥更好的碳汇作用。

3.3 估算方法对森林生态系统碳储量估算的影响

由于获取各种植被类型的含碳量比较困难,国内外研究者在估算碳储量及碳通量时大多采用的含碳量为 45.00% 和 50.00%^[28]。但不同林型^[57-58]、同一树种的不同器官的含碳量^[43,57,59]和同一林型的不同生长阶段^[57,59],差异可能较大,从而对森林植被碳储量的估算产生不同程度的影响。方精云等^[9]运用生物量转换因子连续函数法,利用已发表的生物量文献数据建立的生物-蓄积量的线性模型,估算了我国森林的生物量和碳储量。但上述的估计没有充分考虑林龄对林木蓄积量与生物量之间关系的影响、林下植物生物量和对我国森林生态系统碳密度的分布规律和影响因素的分析,并存在样本量不足的问题^[10-11]。赵敏等利用近 300 组生物量和蓄积量数据,建立了各森林植被类型生物量-蓄积量的双曲线模型,并估算出全国森林植被碳储量,并指出所建模型克服了将森林植被生物量与其蓄积量之比作为常数的不足^[11]。黄从德分别利用实测样地数据建立模型和方精云等的模型估算了四川省森林生物量。结果表明,方精云等模型比其所建模型估算结果高 13.6%^[9,60]。从以上分析可以看出,森林生物量模型对森林植被碳储量估算结果影响很大。为了更准确的估算区域尺度上的森林植被碳储量,应该根据不同的林分类型采用不同的含碳量作为转换系数。因此,基于实测的林分含碳量与区域生物量-蓄积量模型相结合的方法对于精确估算区域森林植被碳储量具有重要意义。

参考文献:

- [1] UNCCC. United Nations Climate Change Conference, 2009 [C]. <http://en.wikipedia.org/wiki/2009>.
- [2] Nabuurs G J, Schelhaas M J, Field C B. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999 [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 152-160.
- [3] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the US forest sector from 1990 to 2010 [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1): 14-27.
- [4] Woodall C, Heath L, Smith J. National inventories of down and dead woody material forest carbon stocks in the United States: challenges and opportunities [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 221-228.
- [5] Ciais P, Tans P, Trolier M, et al. A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂ [J]. *Science-New York the Washington*, 1995: 1098-1098.
- [6] Bousquet P, Peylin P, Ciais P, et al. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980 [J]. *Science*, 2000, 290(5495): 1342-1346.
- [7] Dixon R K, Solomon A, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [8] Houghton R, Skole D, Nobre C A, et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon [J]. *Nature*, 2000, 403(6767): 301-304.
- [9] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [10] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [11] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳储量及其影响因子分析 [J]. *地理科学*, 2004(1): 50-54.
- [12] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究 [J]. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 11-19.
- [13] Houghton R, Hackler J, Lawrence K. The US carbon budget: contributions from land-use change [J]. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [14] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应 [J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513-517.
- [15] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献 [J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [16] Houghton R. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? [J]. *Global change biology*, 2003, 9(4): 500-509.
- [17] Zhang X-Q, Xu D. Potential carbon sequestration in China's forests [J]. *Environmental Science & Policy*, 2003, 6(5): 421-432.
- [18] 周生贤. 充满希望的十年一新时期中国林业跨越式发展规划 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [19] 国家林业局. 中国森林发展报告 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [20] 刘萍, 施苗英, 尹润生. 中国森林固碳及提供其他生态服务功能的潜力和挑战 [J]. *林业经济*, 2010(3): 26-29.
- [21] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [22] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量与碳平衡 [J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [23] 罗天祥, 李文华. 青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布 [J]. *地理研究*, 1998, 17(4): 337-344.
- [24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [25] 罗天祥, 李文华, 罗辑, 等. 青藏高原主要植被类型生物生产量的比较研究 [J]. 1999,
- [26] Luo T, Li W, Zhu H. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(4): 980-997.
- [27] 光增云. 河南森林植被的碳储量研究 [J]. *地域研究与开发*, 2007, 26(1): 76-79.
- [28] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2248-2252.
- [29] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京市森林碳储量及其动态变化 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 117-120.
- [30] 周传艳, 周国逸, 王春林, 等. 广东省森林植被恢复下的碳储量动态 [J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 60-65.
- [31] 王雪军, 黄国胜, 孙玉军, 等. 近 20 年辽宁省森林碳储量及其动态变化 [J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4757-4764.

- [32]叶金盛,余光辉. 广东省森林植被碳储量动态研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2010,34(4):7-12.
- [33]方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981-2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学:D辑,2007,37(6):804-812.
- [34]董旭. 青海省森林资源评价[J]. 安徽农业科学,2009,37(12):5727-5728.
- [35]张永利,杨峰伟,鲁绍伟. 青海省森林生态系统服务功能价值评估[J]. 东北林业大学学报,2008,35(11):74-76.
- [36]王兵,魏文俊. 江西省森林碳储量与碳密度研究[J]. 江西科学,2008,25(6):681-687.
- [37]俞艳霞,张建军,王孟本. 山西省森林植被碳储量及其动态变化研究[J]. 林业资源管理,2009(6):35-39.
- [38]Fang J-Y, Wang G-G, Liu G-H, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship [J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1084-1091.
- [39]Fang J. Forest biomass carbon pool of middle and high latitudes in the north hemisphere is probably much smaller than present estimates [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2000, 24(5): 635-638.
- [40]Fang J Y, Wang Z M. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass [J]. *Ecological Research*, 2001, 16(3): 587-592.
- [41]Leith H, Whittaker R. Primary production of the biosphere [J]. *Ecol Stud*, 1975, 14: 339.
- [42]Brown S, Lugo A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle [J]. *Biotropica*, 1982(3): 161-187.
- [43]方精云,陈安平,赵淑清,等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文 (Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明 [J]. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [44]Alexeyev V, Birdsey R, Stakanov V, et al. Carbon in vegetation of Russian forests: methods to estimate storage and geographical distribution [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 82(1-2): 271-282.
- [45]Turner D P, Koerper G J, Harmon M E, et al. A carbon budget for forests of the conterminous United States [J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(2): 421-436.
- [46]Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123(1): 81-90.
- [47]Zhou Y-R, Yu Z-L, Zhao S-D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [48]Murillo J C R. Temporal variations in the carbon budget of forest ecosystems in Spain [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(2): 461-469.
- [49]曹军,张锦锂,刘燕华. 近20年海南岛森林生态系统碳储量变化 [J]. *地理研究*, 2002, 21(5): 551-560.
- [50]方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义 [J]. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [51]吴丹,邵全琴,刘纪远,等. 1985-2030年江西泰和县森林植被碳储量的时空动态 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 41-46.
- [52]Sun O J, Campbell J, Law B E, et al. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1470-1481.
- [53]Augusto L, Ranger J, Binkley D, et al. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility [J]. *Annals of Forest Science*, 2002, 59(3): 233-253.
- [54]王丽娟,李刚,赵建宁,等. 转基因大豆对根际土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(2): 290-298.
- [55]向泽宇,张莉,张全发,等. 青海不同林分类型土壤养分与微生物功能多样性 [J]. *林业科学*, 50(4): 22-31.
- [56]丁访军,高艳平,周凤娇,等. 贵州西部4种林型土壤有机碳及其剖面分布特征 [J]. *生态环境学报*, 2012(1): 8.
- [57]马钦彦,陈遐林. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5): 96-100.
- [58]方运霆,莫江明,彭少麟,等. 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.
- [59]阮宏华,姜志林,高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究—含量与分布规律 [J]. *生态学杂志*, 1997, 16(6): 17-21.
- [60]黄从德,张健,杨万勤,等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态 [J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 966-975.

(责任编辑 陈虹)