

DOI: 10.5846/stxb201309252358

魏晓华, 郑吉, 刘国华, 刘世荣, 王伟峰, 刘苑秋, Blanco A.Juan.人工林碳汇潜力新概念及应用.生态学报, 2015, 35(12): 3881-3885.

Wei X H, Zheng J, Liu G H, Liu S R, Wang W F, Liu Y Q, Blanco A.Juan. The concept and application of carbon sequestration potentials in plantation forests. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 3881-3885.

人工林碳汇潜力新概念及应用

魏晓华^{1,*}, 郑吉², 刘国华³, 刘世荣⁴, 王伟峰², 刘苑秋², Blanco A.Juan⁵

1 不列颠哥伦比亚大学, 加拿大不列颠哥伦比亚省基洛纳 V1V 1V7

2 江西农业大学林学院, 南昌 330045

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

4 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

5 西班牙纳瓦拉大学, 潘普洛纳 31013

摘要: 定量确定森林碳汇潜力有助于科学地评估森林对碳汇的潜在贡献及制定实现这种潜力所需要的经营管理措施。目前, 国内外有关森林碳汇潜力缺乏统一的概念及计量方法。在综述国内外有关固碳潜力概念的基础上, 引入时间动态构架和可持续性的概念, 提出了针对人工林的固碳潜力概念并利用 FORECAST 模型以杉木人工林为例阐明此概念的实际意义与应用。

关键词: 人工林; 固碳潜力; 可持续森林经营; 碳密度; FORECAST 模型

The concept and application of carbon sequestration potentials in plantation forests

WEI Xiaohua^{1,*}, ZHENG Ji², LIU Guohua³, LIU Shirong⁴, WANG Weifeng², LIU Yuanqiu², BLANCO A.Juan⁵

1 University of British Columbia (Okanagan Campus), Kelowna, British Columbia, Canada V1V 1V7

2 College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Institute of Forest Ecology and Environmental Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

5 Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Navarra, Spain 31013

Abstract: Quantifying the potentials of forest carbon sequestration can scientifically help evaluate the maximum carbon sequestration capacity and design sustainable forest management strategies for achieving its potentials in mitigating climate change impacts. At present, there have been no commonly-accepted concepts and associated quantification methods for defining forest carbon sequestration potentials. In this paper, we first provided a brief literature review on the concepts of carbon sequestration potentials, and then introduced our new concept for defining carbon sequestration potentials in the context of sustainable management of plantation forests. Chinese fir plantation was used as an example to illustrate the proposed concept as well as the way of quantifying forest carbon sequestration potentials by applying the forest ecosystem model FORECAST

Key Words: plantation forests; carbon sequestration potential; sustainable forest management practices; carbon density; FORECAST model

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05060101); 江西省“赣鄱英才 555 工程”项目; 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2013-S117)

收稿日期: 2013-09-25; **网络出版日期:** 2014-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: adam.wei@ubc.ca

全球气候变化正成为世界关注的热点。根据《联合国气候变化框架公约》的定义,将“从大气中清除 CO₂ 的过程、活动和机制”称为“碳汇”。森林是陆地生态系统的主体,森林植被通过光合作用吸收 CO₂,放出 O₂,把大气中的 CO₂ 以生物量的形式固定在植被和土壤中,这个过程和机制实际上就是清除已排放到大气中的 CO₂。因此,森林具有碳汇功能。《京都议定书》允许各国通过人工造林、森林和农田管理等人为活动产生的碳汇,用于抵消本国承诺的温室气体减排指标。通过植树造林和森林保护等措施吸收固定 CO₂,其成本要远低于工业减排。因此,开展碳汇造林是当前推进碳汇林业发展的主要途径之一,也是建设现代林业的重要组成部分。

我国政府高度重视气候变化和生态环境问题。在 2007 年悉尼亚太经济合作高峰会议上,中国政府建议通过大面积恢复森林及减排以应对全球气候变化,做出了到 2020 年我国森林面积比 2005 年增加 4000 万 hm²,森林蓄积量增加 13 亿 m³ 的庄严承诺。目前,发展碳汇林业已作为主要措施纳入到 2007 年 6 月 4 日正式公布的《中国应对气候变化国家方案》中。另外,中国为了改善生态环境,实施了一系列重大的林业生态工程,如退耕还林(草)工程、天然林资源保护工程、三北防护林建设工程、京津风沙源治理工程等。大规模造林及重大林业生态工程的实施,使得中国的森林覆盖率从 80 年代的 16% 增加到现在的 20.36%,有力地促进了中国森林,特别是人工林资源快速的生长。目前,中国的人工造林面积占全球人工造林面积的 73%,中国人工林保存面积居全球第一,占地 6200 万 hm²。然而,大面积的人工造林活动也存在一些生态问题,如森林质量差、生产力低、树种单一等问题十分突出。以江西省“十一五”期间的森林资源为例,森林覆盖率达到 63.1%,其中林地面积 1054.92 万 hm²,人工林面积达到 291.87 万 hm²,占林地面积的 27.67%,可是人工林的单位面积蓄积量只有 36.78 m³/hm²,远低于江西省 51.46 m³/hm² 的平均水平。据第八次全国森林资源清查数据显示,全国林分单位面积蓄积量为 78.06 m³/hm²,仅为世界平均水平(114 m³/hm²) 的 68.5%。中国森林平均碳密度为 41 Mg/hm²,碳密度低于 50 Mg/hm² 的森林占森林总面积的比例为 60%,如果我国森林碳密度能够达到 50 Mg/hm²,将会额外固碳 2.1 Pg^[1]。因此,我国森林特别是人工林的碳密度增加的潜力巨大,但如何计量碳汇增加的潜力及如何根据碳汇潜力的变化调整森林经营管理措施都是目前亟待解决的重要技术问题,本文提出了一个新的人工林固碳潜力概念并举例说明此概念的计算与应用方法。

1 碳汇潜力的概念

现实中,人为经营管理措施影响下的生态系统固碳速率往往与潜在的自然固碳速率之间存在较大的差距,这也正是估算碳汇潜力的理论基础^[2]。目前固碳潜力有不同的定义,中国科学院森林碳专项课题组认为固碳潜力可以用理论最大固碳潜力来表示。评估某一森林类型生态系统的理论最大固碳潜力需要选择适当的参照系,根据森林演替理论选择演替顶级自然林作为该类自然林生态系统理论最大固碳潜力的参照系,而人工林理论最大固碳潜力应选择相应的成熟人工林作为参照,具体计算公式如下:

$$\text{自然林固碳潜力} = \text{演替顶级自然林碳密度} - \text{自然林平均碳密度}$$

$$\text{人工林固碳潜力} = \text{成熟人工林碳密度} - \text{人工林平均碳密度}$$

于贵瑞等^[2]和任伟等人^[3]认为增汇潜力是相对于某个基准水平而言的,在生态系统固碳潜力分析中首先必须明确地定义基准水平(或参考水平)和潜力水平。基准水平指的是在基准年和基准的自然条件或基准的人为调控水平下现实的生态系统固碳速率或者是特定时间、特定区域(特定项目、特定管理、特定政策)生态系统的净固碳总量。生态系统固碳的潜力水平为在特定目标年和环境背景下,生态系统可能达到的最大固碳能力(最大固碳速率或最大固碳总量)。基于基准水平和潜力水平两个概念,于贵瑞等人将生态系统的增汇潜力定义为通过某种自然因素或因素组合,而使得生态系统在基准固碳水平基础上可能增加的固碳速率或者者净固碳总量,即:

$$\text{生态系统增汇潜力} = \text{生态系统潜力固碳水平} - \text{生态系统基准固碳水平}$$

Keith 等^[4-5]在 Gupta 等人^[6]的基础上提出将森林生态系统在一般环境条件和自然干扰下(不包括人为干

扰)所能达到的最大碳储存量与现实碳储量(包括人为干扰)之间的差别定义为森林生态系统的固碳潜力。刘迎春等^[7-8]也提出类似定义,同时还指出评估森林固碳潜力可采用的参考标准有老龄林(或成熟林)碳储量、森林采伐之前碳储量、区域平均固碳速率等指标。并基于此定义,利用碳储量-林龄曲线对黄土丘陵区造林固碳潜力进行了评估。此后,李斌等人^[9]又对森林固碳潜力的概念及估算方法做了进一步的完善,提出现实碳吸存潜力和未来碳吸存潜力两个概念。其中将现实碳吸存固碳潜力定义为现有不同龄组的林分,以其同龄组最高碳密度为标准估算的碳贮量与其现存碳贮量的差值。这一部分碳吸存潜力可通过对现有林分加以更好的抚育和管理,提高林分质量来实现,与龄组转移无关。将未来碳吸存固碳潜力定义为以同龄组林分单位面积最高年净固碳量为标准,估算现有不同龄组林分通过龄组转移,达到成熟林时所能固定的碳量(即未来通过自然生长增加的部分)。基于此定义,他以湖南会同杉木中心产区杉木林分质量高的各龄组林分碳密度作为标准,分龄组估算湖南省现有未成熟杉木林(幼龄林、中龄林和近成熟林)的现实碳吸存潜力。

此外,还有一些学者提出了不同的概念。Cannell^[10]将潜力水平分为三个方面,分别为理论潜力(忽略部分或全部实际的约束条件)、现实潜力(考虑大部分约束条件,但对土地条件和政治经济政策持乐观假设)和保守的可达到的潜力(基于现实趋势的谨慎的预判)。吴庆标等^[11]认为森林植被固碳潜力的估算首先要依据各林业工程的规划林业建设面积和各植被带的林木碳积累速率,再考虑到不同林业建设措施的差异引入修正因子,可用下式表示:

$$C_{\text{potential}} = A \times C \times B$$

式中, A 、 C 和 B 分别是规划林业建设面积、林木碳积累速率和修正因子。

从上述概念中不难看出一个共性,就是缺少时间动态构架,并且没能引入碳汇可持续性的概念。森林是一个动态的系统,经历干扰-恢复-再干扰-再恢复的生态演替过程。对于人工林来讲也是如此,且往往存在明显的衰退问题。如果我们仅用第一代人工林作为参照系,就会高估碳汇潜力。因此,只有在长期可持续的构架下,才能更好地、科学地、完整地确定人工林的碳汇潜力。对于一个森林生态系统而言,它的理论最大固碳量以及理论上存在多少增汇空间固然重要,但人们更关心的是在一个相当长的时期内(比如 100a 以上),通过合理的森林经营管理措施,可以获得多少可持续性的增汇潜力。这不仅仅是学术上的需求,更是国家应对气候变化的碳汇计量的需求。

中国将在较长一段时期内通过恢复森林发展碳汇林业。然而,大量的实践与研究已表明,不合理的人工林组成与结构及经营管理措施会导致一系列的生态问题,最终影响碳汇林业的可持续性。例如,由于不合理的经营管理措施,人工林生产力的长期衰退已成为人们日益关注的焦点^[12-16]。中国南方的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)^[17-20]、中国东北的落叶松(*Larix olgensis*)、澳大利亚东南部和新西兰的辐射松(*Pinus radiata*)^[21-23]经过多次森林采伐后生产力大幅度下降是此类问题的典型案例。基于此,提出了如下人工林固碳潜力的概念:通过调整人工林的经营管理措施,实现可持续森林及碳汇能力前提下的固碳密度与当前现实存在的固碳密度之差,便是未来可能实现的碳汇潜力(图 1)。

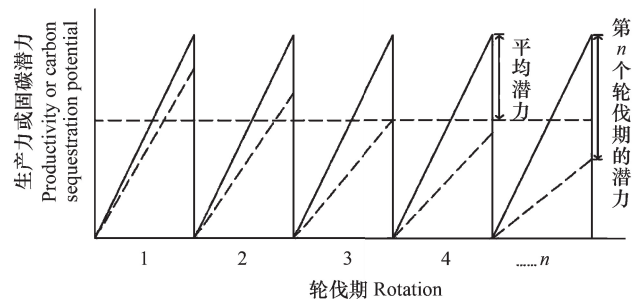


图 1 固碳潜力概念示意图

Fig.1 Graphical representation on the concept of carbon sequestration potential

2 如何定量碳汇潜力

杉木人工林是我国面积最大的人工林,由于过去不合理的经营,造成林地营养不可持续性,多代连载生产力下降等重要问题。为了确定未来人工杉木林的碳汇增加潜力,采用林分尺度的森林生态系统模型 FORECAST 来模拟碳汇增加的潜力。FORECAST 模型是加拿大著名森林生态学教授 Kimmins 经过近 25a 的

开发而建立的一个针对可持续森林经营管理的模型。该模型可模拟林业中的不同管理措施(如轮伐期、采伐利用水平、施肥水平、种植密度、混交比例、疏伐、火烧或炼山等)对长期生产力或碳储量的影响,通过比较不同的经营管理措施,找出针对某一人工林树种可持续的经营管理措施。目前,该模型在世界范围内的一些主要人工林树种中得到了较广泛的应用,有关模型原理的详细介绍及应用案例,参见 Wei 等^[24]、Blanco 等^[25-26]、Kimmins 等^[27-28]、Seely 等^[29]发表的相关论文。

以杉木人工林为例,我们定义其碳汇潜力为可持续生产力下的碳汇能力与目前林业经营下的碳汇能力之差。可持续生产力下的碳汇能力反映了在未来实施可持续经营管理措施下实现的可持续和较高水平的固碳能力,而目前林业经营下的固碳能力则是目前杉木林经营的现实固碳能力。具体模拟采用 Monte Carlo 方法,考虑立地条件、轮伐期、林分密度及树种混交的变异共 200 个模拟情景。通过结果比较,得出,可持续经营管理下的固碳能力要比传统林业经营管理下的固碳能力高出 68%(图 2)^[30]。用来模拟的杉木林可持续经营管理措施包括 3000 株/hm² 的种植密度(杉木 1500 株/hm²,楠木 1500 株/hm²),轮伐期为 40a,采伐方式仅树干采伐,不炼山。可以讲,68% 固碳量的增加则是通过可持续经营管理所能达到的潜力,且此固碳潜力是可持续的。在实际应用时,模拟情景可以少些。

在森林固碳模拟方面,还有一些其它模型可以考虑应用,比如 PROCOMAP^[31]、CO2FIX^[32]、CENTURY^[33]、TRIPLEX^[34-35]、InTEC^[36-38]、3PG^[39] 及 PnET-CN^[40-41]。

3 结论

本文在简要介绍目前主要森林碳汇潜力的概念基础上,提出以可持续森林经营管理下的固碳能力作为确定固碳潜力的参照标准,而不是以追求短期的高固碳能力为目标。其结论是基于可持续森林经营管理生态模型来量化的人工林碳汇潜力的概念,更具科学性、长期性和应用性。用来模拟生产力可持续经营管理的生态系统模型,比如 FORECAST,适用于森林碳汇潜力的定量模拟。

参考文献(References):

- [1] 赵庆建,温作民,张华明. CDM 机制下森林碳汇潜力估算与市场开发政策创新. 科技与管理, 2011, 13(6): 56-59.
- [2] 于贵瑞,王秋凤,刘迎春,刘颖慧. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础. 地理科学进展, 2011, 30(7): 771-787.
- [3] 任伟,王秋凤,刘颖慧,何念鹏,刘迎春,付超,于贵瑞. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力定量认证方法及其不确定性分析. 地理科学进展, 2011, 30(7): 795-804.
- [4] Keith H, Mackey B G, Lindenmayer D B. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2009, 106(28): 11635-11640.
- [5] Keith H, Mackey B, Berry S, Lindenmayer D, Gibbons P. Estimating carbon carrying capacity in natural forest ecosystems across heterogeneous landscapes: addressing sources of error. Global Change Biology, 2010, 16(11): 2971-2989.
- [6] Gupta R K, Rao D L N. Potential of wastelands for sequestering carbon by reforestation. Current Science Bangalore, 1994, 66(5): 378-380.
- [7] 刘迎春,王秋凤,于贵瑞,朱先进,展小云,郭群,杨浩,李胜功,胡中民. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力. 生态学报, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [8] 刘迎春,于贵瑞,王秋凤,张扬建. 全球森林固碳潜力巨大(英文). 资源与生态学报(英文版), 2012, 3(3): 193-201.
- [9] 李斌,方晰,项文化,田大伦. 湖南省杉木林植被碳储量、碳密度及碳吸存潜力. 林业科学, 2013, 49(3): 25-32.
- [10] Cannell M G R. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK.

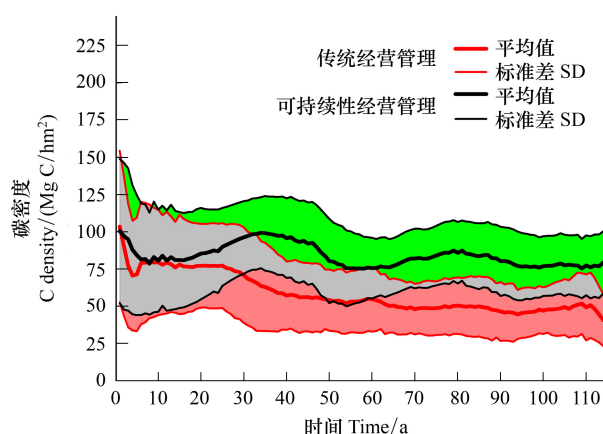


图2 可持续经营与传统经营对杉木林固碳能力的影响^[30]

Fig. 2 The difference in forest carbon sequestration between traditional and sustainable forest management strategies in Chinese fir plantation forests^[30]

- Biomass and Bioenergy, 2003, 24(2): 97-116.
- [11] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 517-524.
- [12] Evans J. Long-term Productivity of Forest Plantation-Status in 1990. IUFRO XIX World Congress, 1990: 165-180.
- [13] Nambiar E K S, Squire R, Cromer R, Turner J, Boardman R. Management of water and nutrient relations to increase forest growth. Forest Ecology and Management, 1990, 30(1/4): 1-486.
- [14] Johnson D W. Reasons for concern over impacts of harvesting // Dyck W J, Cole D W, Comerford N B. Impacts of Forest Harvesting on Long-Term Site Productivity., London, UK: Chapman and Hall, 1994.
- [15] 楼一平, 盛炜彤. 人工林长期立地生产力研究概述. 世界林业研究, 1998, 11(5): 19-26.
- [16] 周霆, 盛炜彤. 关于我国人工林可持续问题. 世界林业研究, 2008, 21(3): 49-53.
- [17] 俞新妥. 中国杉木研究进展(2000—2005) I. 杉木生理生态研究综述. 福建林学院学报, 2006, 26(2): 177-185.
- [18] 盛炜彤, 薛秀康. 福建柏、杉木及其混交林生长与生态效应研究. 林业科学, 1992, 28(5): 397-404.
- [19] 范少辉, 盛炜彤, 马祥庆, 林开敏, 卓仕安, 张小泉. 多代连栽对不同发育阶段杉木人工林生产力的影响. 林业科学研究, 2003, 16(5): 560-567.
- [20] 马祥庆, 范少辉, 陈绍栓, 林上杰. 杉木人工林连作生物生产力的研究. 林业科学, 2003, 39(2): 78-83.
- [21] Keeves A. Some evidence of loss of productivity with successive rotations of *Pinus radiata* in the south-east of South Australia. Australian Forestry, 1966, 30(1): 51-63.
- [22] Squire R O. Review of second rotation silviculture of *Pinus radiata* plantations in southern Australia; establishment practice and expectations. Australian Forestry, 1983, 46(2): 83-90.
- [23] Whyte A G D. Productivity of first and second crops of *Pinus radiata* on the Moutere gravel soils of Nelson. New Zealand Journal of Forestry, 1973, 18(1): 87-103.
- [24] Wei X H, Blanco J A, Jiang H, Kimmins J P H. Effects of nitrogen deposition on carbon sequestration in Chinese fir forest ecosystems. Science of The Total Environment, 2012, 416: 351-361.
- [25] Blanco J A, Zavala M A, Imbert J B, Castillo F J. Sustainability of forest management practices; Evaluation through a simulation model of nutrient cycling. Forest Ecology and Management, 2005, 213(1/3): 209-228.
- [26] Blanco J A, Seely B, Welham C, Scoullar K. Complexity in modelling forest ecosystems; How much is enough? Forest Ecology and Management, 2008, 256(10): 1646-1658.
- [27] Kimmins J P, Mailly D, Seely B. Modelling forest ecosystem net primary production; the hybrid simulation approach used in FORECAST. Ecological Modelling, 1999, 122(3): 195-224.
- [28] Kimmins J P, Blanco J A, Seely B, Welham C, Scoullar K. Forecasting Forest Futures: A Hybrid Modelling Approach to the Assessment of Sustainability of Forest Ecosystems and their Values. Earthscan, London: Routledge, 2010.
- [29] Seely B, Welham C, Kimmins H. Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem; results from the ecosystem simulation model, FORECAST. Forest Ecology and Management, 2002, 169(1/2): 123-135.
- [30] Wei X H, Blanco J A. Significant increase in ecosystem C can be achieved with sustainable forest management in subtropical plantation forests. PLoS ONE, 2014, 9(2): e89688.
- [31] Hooda N, Gera M, Andrasko K, Sathaye J, Gupta M K, Vasistha H B, Chandran M, Rassaily S S. Community and farm forestry climate mitigation projects: case studies from Uttarakhand, India. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2007, 12(6): 1099-1130.
- [32] Masera O, Garza-Caligaris J F, Kanninen M, Karjalainen T, Liski J, Nabuurs G J, Pussinen A, De Jong B J, Mohren G M J. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V. 2 approach. Ecological Modelling, 2003, 164(2/3): 177-199.
- [33] 黄忠良. 运用 Century 模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响. 植物生态学报, 2000, 24(2): 175-179.
- [34] 王灿, 项文化, 赵梅芳, 邓湘雯, 彭长辉. 基于 TRIPLEX 模型的湖南省杉木林生产力模拟及预测. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(6): 104-109.
- [35] 王灿. TRIPLEX 模型对湖南杉木林生产力的模拟和预测[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [36] Chen J M, Liu J, Cihlar J, Goulden M L. Daily canopy photosynthesis model through Temporal and spatial scaling for remote sensing applications. Ecological Modelling, 1999, 124(2/3): 99-119.
- [37] 邵月红. 我国亚热带和温带土壤有机碳动态变化及 InTEC 模型的验证[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [38] 杨丽霞. 利用森林生态系统碳循环综合模型模拟土壤有机碳动态变化[D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
- [39] 花利忠. 雷州半岛桉树人工林 3PG 模型的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2004.
- [40] 巴特尔·巴克, 张旭东, 彭镇华, 周金星, 韩帅, 黄玲玲. 森林生态系统模型 PnET 及其应用. 中国农业气象, 2007, 28(2): 159-161, 182-182.
- [41] 颜元, 王绍强, 王义东, 伍卫星, 王晶苑, 陈斌, 杨风亭. 基于 PnET-CN 模型的亚热带人工针叶林生产力与固碳潜力模拟研究(英文). 地理学报(英文版), 2011, 21(3): 458-474.