

中国森林植被的碳汇/源空间分布格局

刘双娜^{①②}, 周涛^{①②*}, 魏林艳^{①②}, 舒阳^{②③}

① 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

② 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

③ 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

* 联系人, E-mail: tzhou@bnu.edu.cn

2011-10-18 收稿, 2012-01-06 接受

国家重点基础研究发展计划(2012CB955401)、国家自然科学基金(30970514, 30590384)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0251)资助

摘要 利用 1984~1988 年和 1999~2003 年间 2 次森林详查资料, 结合 1:100 万森林植被图及同期基于 CASA 模型模拟的 NPP 空间分布, 采用空间降尺度技术, 定量估算了 1 km 分辨率下 1984~2003 年间我国森林植被碳源/汇的空间分布. 结果表明: (1) 在 1984~2003 年间我国森林植被是大气的碳汇, 碳储量增加了 0.77 PgC, 年均增加约为 51.0 Tg a^{-1} . 其中, 碳的吸收量为 0.88 PgC, 释放量为 0.11 PgC. (2) 我国森林植被碳汇/源分布存在明显的空间分布规律, 碳汇面积主要集中在亚热带和温带地区, 高值区集中在海南地区、横断山脉地区、吉林境内的长白山脉, 大兴安岭南部和西北山地; 碳源主要分布在以东北至西南一带上, 高值区主要集中在云南南部、大兴安岭北部和四川盆地中部. (3) 碳汇强度与 NPP 的增长存在明显关联性, 统计模型表明东北、华北、西北以及中南 4 个地区的碳汇量 80% 以上的变化能够由 NPP 增长驱动来解释. (4) 碳汇强度的空间分布与森林林龄分布存在着明显的对应关系, 碳汇强度整体上随着林龄的增加而降低.

关键词

森林植被
碳汇
碳源
降尺度
空间分布

全球与区域碳循环及碳收支的微小变化都会导致大气 CO_2 浓度的明显波动, 从而进一步影响全球气候的稳定^[1], 加之它与“京都议定书”的紧密联系, 使得全球和区域碳循环及碳收支的动态变化研究成为了全球变化研究的核心内容之一. 尽管学术界认同陆地生态系统巨大的碳汇功能, 但在碳汇的大小尤其是具体的空间分布方面还存在较大的不确定性^[2]. 森林作为陆地生态系统中最大的碳库^[3], 阐明我国森林生态系统的碳汇/源空间分布格局不仅对研究北半球陆地生态系统碳循环至关重要, 而且对应对全球变暖也有着举足轻重的作用.

目前, 传统的区域尺度陆地生态系统碳收支的方法主要包括植物生物量和土壤碳储量清单调查、生态系统通量观测、卫星遥感、大气 CO_2 浓度反演以及生态系统模型模拟等^[4]. 由于每种研究方法均有各自的优缺点, 导致不同尺度陆地碳源/汇评估结果具

有很大的不确定性^[5-9]. 比如, 赵敏等人^[10]对 1989~1993 年间我国森林生态系统碳储量的评估与周玉荣等人^[11]的研究结果相差将近 1 倍, Piao 等人^[12]利用过程模型、大气反演模型和遥感方法对我国陆地生态系统碳收支评估的研究发现, 不同的方法对于同一地区(如东北地区), 会出现碳源/汇截然不同的结论.

为了进一步减少森林植被碳汇强度估算的不确定性, 并提供碳汇/源的空间分布格局, 将遥感数据与森林资源清查资料结合起来显得极为重要, 它既能发挥遥感数据的空间定位准确的优势, 又能体现地面详查资料估算碳储量定量准确的优势. 近年来将清单调查与遥感数据相结合利用降尺度技术估算生态系统特征的方法已经在芬兰、美国、欧洲等地取得了较好的应用^[13-17]. 本研究将试图利用我国 1984~1988 年和 1999~2003 年间两次森林资源清查资料, 结合 1:100 万森林植被图及同期由 CASA 模型模

拟的 NPP 空间分布数据,采用降尺度技术,定量估算 1 km 分辨率下 1984~2003 年间我国森林植被碳源/汇的空间分布。

1 数据与方法

1.1 数据

森林详查数据来自国家林业局森林资源管理司的《全国森林资源统计》(1984~1988, 1999~2003)。森林类型数据来自反映 20 世纪 80 和 90 年代中国植被情况的《中华人民共和国植被图(1:1000000)》。

本研究中我们采用的 NDVI 产品为 GIMMS NDVI (<http://www.glcf.umd.edu/data/gimms>), 该数据集源于美国 NOAA 卫星(NOAA 7, 9, 11, 14, 16, 17)的高级甚高分辨率辐射仪(AVHRR)资料, 数据集为每 15 天合成的最大化 NDVI 数据, 分辨率为 8 km。GIMMS NDVI 产品进行了多种校正, 消除了传感器老化、卫星轨道偏移、太阳天顶角变化、火山作用引起的气溶胶等与植被变化无关的因素的影响^[18~20]。

NPP 空间分布数据来自基于遥感数据的光能利用率模型(CASA 模型)。CASA 模型由于能较好地模拟区域尺度 NPP 的空间分布及变化, 它们广泛应用于各种空间尺度的 NPP 监测^[21~23], 其产品准确性已由地面实测方法所证实^[24,25]。

1.2 方法

本文以 Kindermann 等人^[16]的降尺度方法为基础,

并对其进行了改善以更好地用于中国森林生态系统, 技术路线如图 1 所示。具体步骤: (1) NPP 数据的生成。计算 1984~1988 年和 1999~2003 年月均 NDVI 值, 并将 600 余个站点的气象数据进行 Kriging 插值, 使所有数据在分辨率等空间属性上一致。最后将预处理后的月均 NDVI、月平均温度、月降水量和和月辐射值栅格数据, 通过 CASA 模型模拟得到了 1984~1988 年、1999~2003 年年均 NPP 数据, 进而计算得到两个时间段 NPP 多年平均数据。本研究采用多年平均处理, 目的是减少气候因子年际波动带来的影响^[26]。(2) 森林植被碳储量统计数据的计算。参考《国家森林资源清查主要技术规定》将两个时期森林详查数据的各省份共 700 个优势树种划分为三大类森林植被类型(针叶林、阔叶林和混交林), 然后运用换算因子连续函数法^[27,28]分别估算 1984~1988 年和 1999~2003 年我国各省三大类型森林植被碳储量均值, 最后利用郁闭度 20%与 30%的标准下森林植被碳储量转换函数^[29]校正 1984~1988 年各省三大类型森林植被碳储量均值数据。(3) 森林植被碳储量均值分布图的计算。其一, 森林类型图的处理是根据《中华人民共和国植被图(1:1000000)》属性数据计算中国三大森林植被类型分布图(针叶林, 阔叶林, 混交林)。其二, 将处理后的三大森林植被类型分布图与以上两期我国各省三大类型森林植被碳储量均值统计数据相匹配, 得到两期森林植被碳储量均值空间分布图。(4) 碳汇/源空间分布图的计算。在两期森林植被碳储量均值空间分布图的基础上利用空间降尺度方法分别

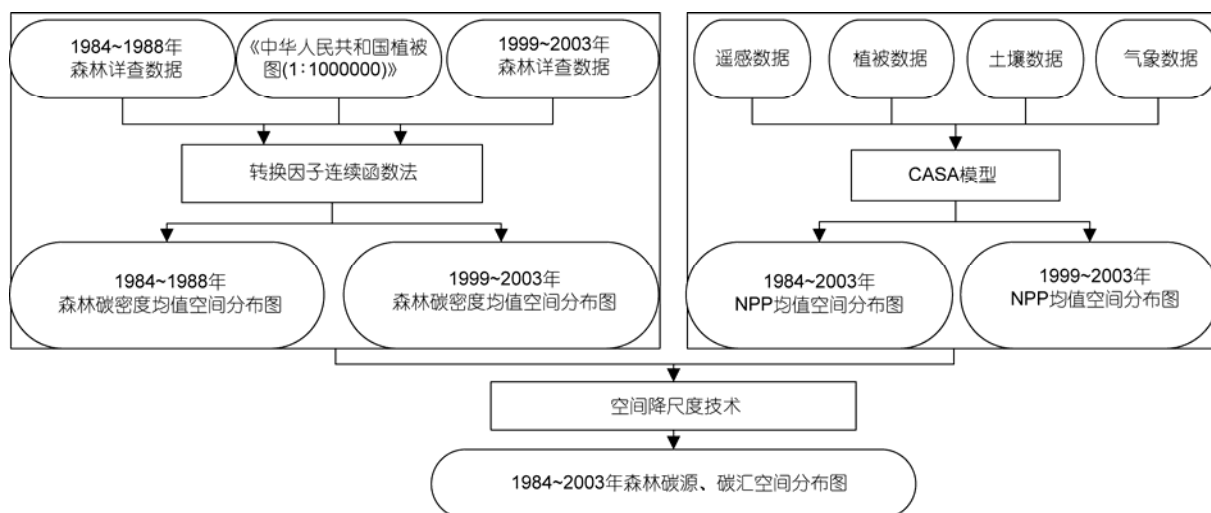


图 1 估算中国碳汇/源空间分布的技术路线图

计算得到两期 1 km 分辨率的森林植被碳密度空间分布图, 进而得到 1984~2003 年间我国森林植被碳源/汇的空间分布图。

(i) CASA-NPP 子模型. 根据 CASA 模型, NPP 可以利用植被指数(NDVI)、光合有效辐射(PAR)、最大可能的光能利用率(ε^*)、温度函数 $g(T)$ 、土壤湿度函数 $h(w)$ 来进行计算^[21,30],

$$NPP = PAR \times f(NDVI) \times \varepsilon^* \times g(T) \times h(w), \quad (1)$$

式中的光合有效辐射(PAR)从地表太阳辐射(R)中估算得出($PAR=0.5R$), 本文采用的地表太阳辐射数据为中国气象局提供的全国约 120 个站点的月平均太阳辐射观测数据; 在到达地表的总的光合有效辐射中, 被植被接收的比率取决于地表植被的状况, 它是标准化差值植被指数(NDVI)的函数, 即 $f(NDVI)$ 表示植被吸收的光合有效辐射占总的光合有效辐射的比率, 因此, 式(1)中 $PAR \times f(NDVI)$ 等于被植被吸收的光合有效辐射(APAR); 在光能利用率模型中, 除了光能外, 光合作用的产物(NPP)还取决于植被将光能转化为有机质的光能转化效率(ε), 因此 NPP 是植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(ε)的乘积; 由于植被光能利用率(ε)受环境的温度和湿度的影响, 因此在 CASA 模型中, ε 用最大可能的光能利用率(ε^*)、温度(T)和湿度(w)函数来表示, 即 $\varepsilon = \varepsilon^* \times g(T) \times h(w)$, 其中 ε^* 取决于植被类型, 即针对某一植被类型而言它是常数。

(ii) 降尺度方法. 本研究中的降尺度技术基于 Kindermann 等人^[16]的方法, 以森林详查资料中获取的各省三大类森林植被碳储量的均值为基础, 以反映植被生产力空间差异的 NPP 空间分布数据和森林类型分布图为纽带, 建立各空间格点的生物量与对应 NPP 及省域内同类森林植被的生物量均值的转换函数如式 2 所示, 从而估算出各空间格点的碳储量。

$$C_i = \frac{\overline{C_{pt}} \times N_i \times n}{\sum_{i \in p \cap t} N_i} (p=1,2,3,\dots,30)(t=1,2,3)(i=1,2,3,\dots,n), \quad (2)$$

其中 p 表示各省份; t 表示各森林植被类型(针叶林, 针阔混交林, 阔叶林); i 表示某一个格点; $\overline{C_{pt}}$ 表示某省某森林植被类型平均碳储量($MgC \ ha^{-1}$); N_i 表示某格点森林生产力 NPP($gC \ m^{-2} \ a^{-1}$); C_i 表示某格点森林植被碳储量($MgC \ ha^{-1}$); n 表示该省该森林类型的格点数。

2 结果与讨论

2.1 碳汇的空间分布格局

本研究利用 1984~1988 年间(中值为 1986 年)和 1999~2003 年间(中值为 2001 年)两个时段间隔 15 年的森林清查资料, 结合 1:100 万森林植被图及同期基于 CASA 模型模拟的 NPP 空间分布, 在空间降尺度技术的支持下, 定量估算了 1 km 分辨率下 1984~2003 年间森林植被的碳汇/源的空间分布(图 2), 其地图投影为 Albers 等积割圆锥投影, 标准纬线为 25°和 47°N, 中央经线为 110°E. 研究表明, 1984~2003 期间我国森林生态系统主要表现为碳汇, 这与 NPP 表现出一定的增长趋势一致^[31], 碳汇的面积占 $107.27 \times 10^6 \ ha$ (占森林植被总面积的 76.6%), 碳固定总量为 0.88 PgC, 年均碳固定量约 $58.67 \ TgC \ a^{-1}$. 从空间分布上来看, 我国森林植被碳汇分布存在一定的规律, 具有碳汇功能的森林面积由东南向西北逐渐减少, 其中碳汇的高值区集中在海南地区、横断山脉地区以及吉林境内的长白山地区. 1984~2003 年期间表现为碳源的森林面积占 $32.81 \times 10^6 \ ha$ (占森林植被总面积的 23.4%), 碳释放总量为 0.11 PgC, 年均碳释放量为 $7.33 \ TgC \ a^{-1}$. 从空间分布上来看, 表现为碳源的森林植被主要分布在东北至西南一带, 其中碳源高值区主要集中在云南南部和大兴安岭北部地区。

我国森林植被碳汇分布格局(图 2)的统计结果表明: (1) 1984~2003 年期间除云南省外所有省级行政区均表现为碳汇, 碳固定总量较高的省级行政区由大到小依次为西藏、内蒙古、四川、吉林和新疆, 较低的省级行政区由小到大依次为天津、北京、宁夏、江苏和河北; 碳的净收支由大到小依次为西藏、内蒙古、吉林和四川(表 S1). (2) 1984~2003 年期间我国境内阔叶林、针叶林和混交林的固碳总量依次为 445.70×10^6 , 417.40×10^6 , $16.65 \times 10^6 \ MgC$ (表 S2), 年均固碳强度依次为 60.83, 51.56, 24.83 $gC \ m^{-2} \ a^{-1}$. (3) 我国森林林龄组碳汇强度由大到小依次为中龄林、幼龄林、近熟林、成熟林、过熟林, 碳汇强度整体上随着林龄的增加而逐渐降低。

综合所有森林格点(图 2), 中国森林生态系统整体上表现为碳汇, 1984~2003 年间净碳汇量为 0.77 PgC, 年均碳汇量 $51.0 \ TgC \ a^{-1}$, 该碳汇值与大多数学者基于模型或清查统计结果基本一致(表 1). 由于方法和数据的差异, 中国森林植被碳汇的估算值差异较大,

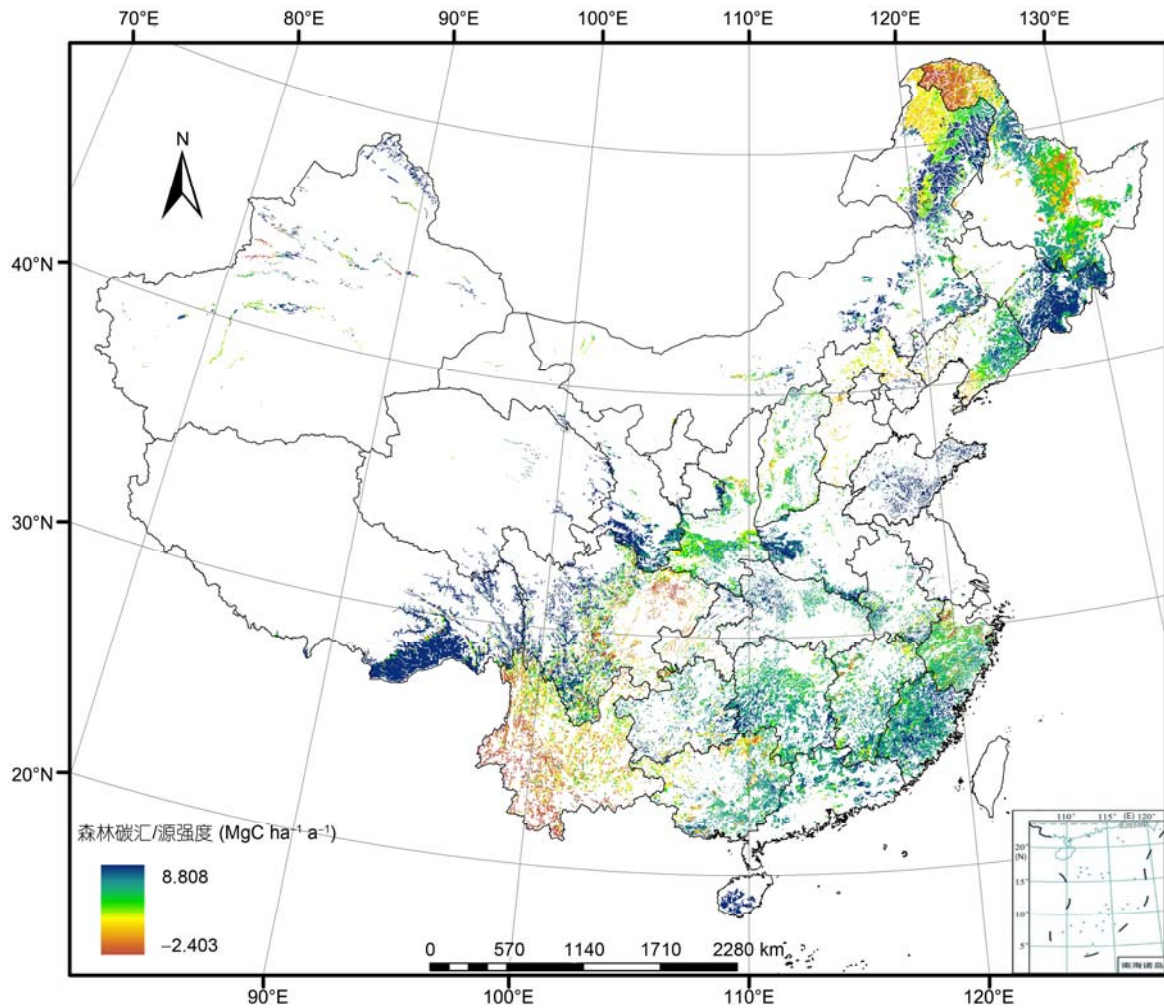


图2 中国1984~2003年间森林植被碳汇/源空间分布图
 正值为碳汇, 负值为碳源, 缺台湾省数据

表1 中国森林生态系统碳汇估算结果的比较

时段	森林面积 (10 ⁶ ha)	森林植被总碳 汇量(TgC a ⁻¹)	森林植被平均碳 汇(gC m ⁻² a ⁻¹)	文献
1984~2003	140.05	51	36.4	本研究
1990~1999	142.8	60	42.0	[2]
1981~2000	142.8	75	52.5	[29]
2000~2007	155.6	115	73.9	[2]
1981~2000	126~137	82	61.3	[7]
1982~1999	124.3	34	27.4	[32]
1981~1999	127.9	19	15.0	[33]
20世纪90 年代	130.5	66	51.6	[34]

估算的森林植被年碳汇总量在 19~115 TgC a⁻¹变化, 单位面积的碳汇值在 15~73.9 gC m⁻² a⁻¹之间变化. 与其他基于清查资料的碳汇结果相比, 本研究所估

算的森林植被碳汇略有偏低, 主要原因是本研究对 1984~1988 年的生物量进行了校正. 1994 年之前森林清查的森林郁闭度为 30%, 之后重新定义为 20%^[29], 这导致 1994 年之前基于森林详查计算的总碳储量小于真实值(按 20%的郁闭度标准). 因此, 本文利用方精云等人^[29]提出的不同郁闭度森林植被碳储量的转换函数, 将由森林详查计算得到的 1984~1988 年森林植被碳储量校正到 20%郁闭度下森林植被的碳储量(即相对提高了该时段的总生物量), 然后再进行降尺度, 这种校正导致本研究 1984~1988 的总生物量增加, 从而相对地降低了 1984~2003 年的碳汇量.

2.2 碳汇与 NPP 增长驱动的关系

生态系统碳汇产生的根源是生态系统碳循环过

程中的收支不平衡,它的大小和趋势同时受控于生态系统内在的碳循环机理和外在的驱动因素^[35]。因此,森林生态系统的碳汇量及其空间分布格局取决于两个关键因素,其一是 NPP 增长驱动的强度和长期趋势,它导致更多的大气碳进入到森林生态系统各碳库中,使生态系统碳的净吸收成为可能,其二是森林生态系统的碳周转时间,它影响着碳在系统中的驻留时间并最终控制碳库的增长潜力^[36,37]。研究和分析生态系统的碳汇空间格局与 NPP 增长驱动的关系,不仅能更好地理解碳汇空间格局产生的机理,而且有助于更好地预测未来的碳汇潜力。

本研究的结果表明,中国森林生态系统的碳汇的强度及空间分布格局与同期的 NPP 增长驱动存在显著的关联性,森林植被的碳汇强度显著受到 NPP 的增长驱动的影响(图 3)。碳汇与 NPP 增长的回归模型表明,东北、华北、西北以及中南 4 个地区的碳汇强度受 NPP 的增长量的影响最大,其碳汇量 80%以上变化能够由 NPP 增长驱动来解释,其中东北地区受 NPP 增长的影响最强,回归模型的可决系数(R^2)超过了 0.92。相比之下,西南地区的碳汇受 NPP 增长驱动的影响较小($R^2=0.223$),模拟的碳汇存在较大的不确定性,这可能与该地区生态系统碳周转时间差异大^[38], 水热条件的空间变化大有关,从而降低了 NPP 增长驱动因素对碳汇的解释率。

2.3 碳汇与森林林龄的关系

在森林生态系统碳储量与碳汇的模拟和预测研究中,林龄是一个至关重要的参数^[39,40]。林龄不仅与 NPP 关系密切,直接影响森林植被的 NPP 量及 NPP 变化趋势^[41],它还影响着光合作用有机物的分配与生物量的累积^[42],因而是模拟和预测森林植被碳汇潜力的关键参数^[8,43]。

本研究的结果表明,1984~2003 年间中国森林植被的碳汇分布格局(图 2)与森林林龄的空间分布^[44]有着良好的对应关系。我国森林的林龄整体偏低,平均林龄仅为 40 年左右^[44],这使得我国森林整体上具有较大的生物量累积和碳汇强度,和具有较大林龄的北美碳汇/源^[41]相比存在明显差异。我国东南地区具有较大的碳汇量(图 2),这与我国东南地区的林龄普遍偏低相对应,该地区的森林林龄多为 20~30 年^[44],而在我国西南的四川中部与云南南部等地,森林植被的碳汇强度较小,有些表现为碳源(图 2),这与中国西部地区森林林龄的高值相一致,我国林龄大于 120 年的森林主要分布在四川中部^[44]。

考虑到除林龄外,森林植被碳汇还受人类活动与水热条件差异等多种因素的共同影响,为了更好地表征中国森林植被碳汇格局与林龄的关系,本文选取了受人类活动影响较小且水热条件在区域变化上相对较小的西北地区,分析了其林龄^[44]与森林植

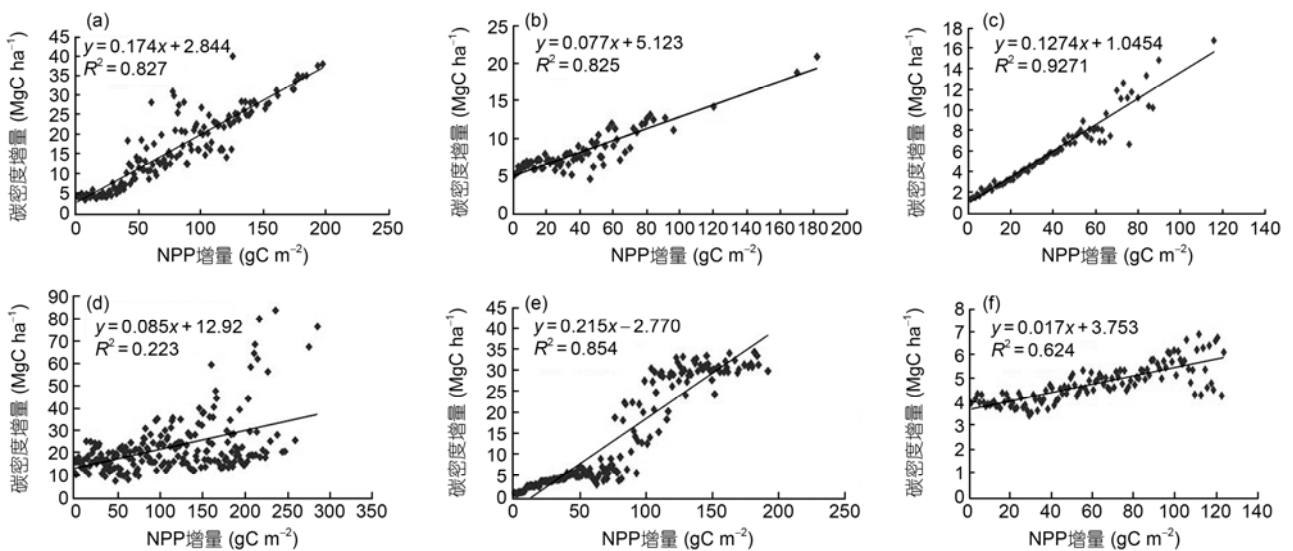


图 3 中国六大区域森林植被 NPP 增长量(gC m^{-2})与森林植被碳密度(MgC ha^{-1})的关系
缺台湾省数据。(a) 西北地区;(b) 华北地区;(c) 东北地区;(d) 西南地区;(e) 中南地区;(f) 华东地区

被碳汇强度的关系(图4). 结果表明, 在我国不同的森林林龄组中, 中龄林和幼龄林的碳密度在 1984~2003 年间变化量最大, 它们具有最大的碳汇强度, 而近熟林和成熟林相对较小, 过熟林最小(图4). 图 4 所反映出来的碳汇随林龄的变化, 与传统生态学林龄和生物量关系的 Logistic 模型^[43]是一致的, 即在幼龄和中龄阶段, 随着林龄的增大生物量快速增长, 碳汇强度大, 之后生物量增长逐步变小直至达到近似平衡状态.

全国第六次森林资源清查的结果表明, 与天然林相比, 人工林在林龄上更小, 碳汇潜力更大. 如天然林中, 中龄林面积最大(占 34.07%), 而幼龄林面积排第二位(占 30.99%); 而人工林中, 幼龄的面积最大(占 40.24%), 中龄林面积排第二位(占 37.16%). 考虑到人工林在我国的分布的不均匀性, 这在一定程度上影响着我国森林碳汇的分布, 如全国人工林面积较多的 6 个省级行政区(内蒙古、四川、福建、湖南、广东、广西)均有较大的净收支量, 尤其以内蒙古、四川、福建与湖南 4 个行政区表现突出(表 S1). 尽管如此, 考虑到人工林面积与其活立木蓄积量占全国森林的总面积与活木总蓄积量的比重较小(分别为 21.0%与 11.45%), 因此, 全国的碳汇分布格局与人工林的分布并不具备简单的对应关系.

2.4 碳汇结果的不确定性

影响森林碳汇/源的空间分布的因素复杂, 它不仅受自然因素或扰动的影响(如大气 CO₂ 浓度升高所导致的施肥效应、氮沉降、气候变化、火灾与病虫害等), 同时受人类活动直接影响(如森林砍伐与植树造林等), 因此, 要系统地区分自然和人为因素所导致的碳汇量, 其难度还较大. 从机理上说, 森林碳汇的根源在于森林的再生长(restoration)与森林的增强生长(enhancement), 这两种方式都会导致森林的林龄

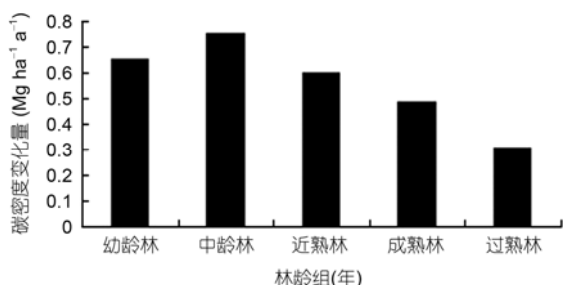


图4 林龄组与森林植被碳密度变化量(MgC ha⁻¹ a⁻¹)的关系图

变化以及遥感监测到的森林生态系统的 NPP 的变化, 从而综合地反映在森林碳汇的降尺度估算结果中, 但要准确区分自然林/人工林的碳汇量还需要更细致的研究与资料.

本研究两期森林植被碳密度空间分布图采用同一森林类型图(1:100 万植被图), 它不能很好地反映土地利用变化的影响. 本研究曾试图数字化中国森林资源图集^[45], 使两类森林类型图分别与同时期的森林详查资料相匹配再计算碳源/汇空间分布. 但是结果表明中国森林资源图集森林覆盖面积为 115.59 × 10⁶ ha, 1:100 万森林植被图面积为 151.44 × 10⁶ ha(包括台湾省数据), 都与森林详查资料森林面积(120.99 × 10⁶~142.79 × 10⁶ ha)有一定差距. 而 1:100 万森林植被图是目前学界普遍公认的森林植被类型图, 而且由于此图工作量大耗时长, 反映的是 20 世纪 80 和 90 年代森林类型情况, 恰处于我们的研究时期之内. 另外大规模的林业建设工程——“六大林业工程”2002 年才正式启动, 对我们研究时段的森林自然生长的碳源/汇效益影响相对较小.

本研究所采用的光能利用率模型(CASA 模型)所模拟的森林生态系统的 NPP 的结果依赖于植被指数(NDVI). 在当前长序列的植被动态变化监测中, 通常采用的 NDVI 数据集包括 GIMMS NDVI, MODIS NDVI, SPOT-Vegetation NDVI 等, 由于这些数据源在传感器和算法方面存在一定的差别, 因而, 基于不同 NDVI 数据集所模拟的 NPP 及森林生物量存在一定的偏差, 从而在一定程度上造成碳汇估算值的不确定性. 在本研究中, 我们采用 GIMMS NDVI 来模拟 NPP, 这主要考虑到和其他 NDVI 产品(如 MODIS NDVI, SPOT-Vegetation NDVI)相比, GIMMS NDVI 产品的时间序列长(1981~2006 年), 完全包含了本研究的时段(1984~2003 年), 这有助于避免研究中采用不同的传感器产品, 从而潜在地降低不同数据源可能存在的系统偏差的影响.

从文献对比来看(表 1), 本研究采用的遥感数据与森林清查统计数据相结合的降尺度估算的碳汇结果, 一方面保留了遥感数据在空间分布上的优势, 使碳汇/源在空间格局上与其他基于遥感方法的研究结果整体一致, 另一方面保留了森林清查数据准确性的优势, 使碳汇/源在数量上与清查结果更为接近, 从而有效降低遥感数据和遥感模型本身在校验方面的系统性误差.

3 结论

(1) 在 1984~2003 年间我国森林植被是大气的碳汇, 碳储量增加了 0.77 PgC, 年均增加约为 50.0 Tg a^{-1} . 其中, 碳的吸收量 0.88 PgC, 释放量为 0.11 PgC. (2) 我国森林植被碳源、碳汇分布存在一定的空间分布规律, 碳汇主要集中在亚热带和温带地区, 而碳源主要分布在以东北至西南一带上. (3) 碳汇强度与 NPP

增加量存在着明显的关联性, 同时也与林龄的空间分布有关, 它随着林龄的增加而降低. (4) 降尺度技术能有效结合遥感数据的空间特征与地面详查资料的统计特征, 既保留遥感数据在空间分布上的优势, 又保留森林清查数据准确性的优势, 从而使碳汇/源不仅在数量上具有较高的准确性, 同时也能反映出格点尺度的空间格局, 从而较好地解决当前碳汇强度估算的区域尺度转化问题.

参考文献

- 1 Raupach M R. Carbon cycle: Pinning down the land carbon sink. *Nat Clim Change*, 2011, 1: 148–149
- 2 Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333: 988–993
- 3 徐德福, 王让会, 李映雪, 等. 陆地生态系统碳收支及其主要影响因素分析. *中国农业气象*, 2009, 30: 519–524
- 4 于贵瑞, 王秋凤, 朱先进. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性. *地理科学进展*, 2011, 30: 103–113
- 5 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 2007, 26: 1–10
- 6 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. *应用生态学报*, 2001, 12: 13–16
- 7 Tian H, Melillo J, Lu C, et al. China's terrestrial carbon balance: Contribution from multiple global change factors. *Glob Biogeochem Cycle*, 2011, 25: GB1007
- 8 Wang S Q, Zhou L, Chen J M, et al. Relationships between net primary productivity and stand age for several forest types and their influence on China's carbon balance. *J Environ Manage*, 2011, 92: 1651–1662
- 9 马晓哲, 王铮. 中国分省区森林碳汇量的一个估计. *科学通报*, 2011, 56: 433–439
- 10 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24: 50–54
- 11 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24: 518–522
- 12 Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009–1013
- 13 Tomppo E, Nilsson M, Rosengren M, et al. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. *Remote Sens Environ*, 2002, 82: 156–171
- 14 Zheng D, Heath L S, Ducey M J. Forest biomass estimated from MODIS and FIA data in the Lake States: MN, WI and MI, USA. *Forestry*, 2007, 80: 265–278
- 15 Blackard J A, Finco M V, Helmer E H, et al. Mapping U.S. forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information. *Remote Sens Environ*, 2008, 112: 1658–1677
- 16 Kindermann G E, McCallum I, Fritz S, et al. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fenn*, 2008, 42: 387–396
- 17 Paivinen R B, Russelen J V, Schuck A. The growing stock of European forests using remote sensing and forest inventory data. *Forestry*, 2009, 82: 479–490
- 18 Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E. Global Inventory Modeling and Mapping Studies, NA94apr15b.n11-VIg, 2.0, 2004, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, 04/15/1994
- 19 Pinzon J, Brown M E, Tucker C J. Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition. In: Huang N, ed. *Hilbert-Huang Transform: Introduction and Applications*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2005. 167–186
- 20 Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *Int J Remote Sens*, 2005, 26: 4485–4498
- 21 Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Glob Biogeochem Cycle*, 1993, 7: 811–841
- 22 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China. *Glob Biogeochem Cycle*, 2005, 19: GB2027
- 23 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51: 700–706
- 24 Hicke J A, Asner G P, Randerson J T, et al. Trends in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982–1998. *Glob Biogeochem Cycle*, 2002, 16: 1018

- 25 Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982–1998. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 722–735
- 26 Lovett R A. Rain might be leading carbon sink factor. *Science*, 2002, 296: 1787
- 27 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
- 28 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
- 29 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 804–812
- 30 Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sens Environ*, 1995, 51: 74–88
- 31 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 等. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. *科学通报*, 2007, 52: 2535–2541
- 32 李秀娟, 周涛, 何学兆. NPP 增长驱动下的中国森林生态系统碳汇. *自然资源学报*, 2009, 24: 491–497
- 33 Piao S L, Fang J Y, Zhu B, et al. Forest biomass carbon stocks in China over the past two decades: Estimation based on integrated inventory and satellite data. *J Geophys Res*, 2005, 110: G01006
- 34 Pan Y D, Luo T X, Birdsey R, et al. New estimations of carbon storage and sequestration in China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Clim Change*, 2004, 67: 211–236
- 35 Luo Y Q, Weng E S. Dynamic disequilibrium of the terrestrial carbon cycle under global change. *Trends Ecol Evol*, 2011, 26: 96–104
- 36 Luo Y Q, White L W, Canadell J G, et al. Sustainability of terrestrial carbon sequestration: A case study in Duke Forest with inversion approach. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17: 1021
- 37 Zhou T, Luo Y Q. Spatial patterns of ecosystem carbon residence time and NPP-driven carbon uptake in the conterminous United States. *Glob Biogeochem Cycle*, 2008, 22: GB3032
- 38 周涛, 史培军, 贾根锁, 等. 中国森林生态系统碳周转时间的空间格局. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 632–644
- 39 Chen J M, Ju W, Cihlar J, et al. Spatial distribution of carbon sources and sinks in Canada's forests. *Tellus B*, 2003, 55: 622–641
- 40 Bradford J B, Birdsey R A, Joyce L A, et al. Tree age, disturbance history, and carbon stocks and fluxes in subalpine Rocky Mountain forests. *Glob Change Biol*, 2008, 14: 2882–2897
- 41 Chen W, Chen J, Price D T, et al. Effects of stand age on net primary productivity of boreal black spruce forests in Ontario, Canada. *Can J Forest Res*, 2002, 32: 833–842
- 42 Piao S L, Luysaert S, Ciais P, et al. Forest annual carbon cost: A global-scale analysis of autotrophic respiration. *Ecology*, 2010, 91: 652–661
- 43 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2000~2050年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40: 587–594
- 44 戴铭, 周涛, 杨玲玲, 等. 基于森林详查与遥感数据降尺度技术估算中国林龄的空间分布. *地理研究*, 2011, 30: 172–184
- 45 肖兴威. *中国森林资源图集*. 北京: 中国林业出版社, 2005

补充材料

表 S1 各省级行政区森林植被碳汇/碳源面积、总量、强度的比较

表 S2 三大类森林植被类型碳汇/碳源总量、面积比较

本文的以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

表 S1 各省级行政区森林植被碳汇/碳源面积、总量、强度的比较

行政区	碳汇			碳源			净收支 (TgC)
	碳汇面积 (10 ⁶ ha)	碳吸收量 (Tg)	碳吸收量强度 (MgC ha ⁻¹ a ⁻¹)	碳源面积 (10 ⁶ ha)	碳释放量 (Tg)	碳释放强度 (MgC ha ⁻¹ a ⁻¹)	
西藏	8.96	367.18	2.73	0.31	0.95	0.21	366.23
新疆	2.00	36.14	1.20	0.34	2.67	0.52	33.47
青海	0.74	11.78	1.07	0.01	0.01	0.09	11.77
云南	1.64	4.00	0.16	8.36	48.73	0.39	-44.73
广西	4.94	17.81	0.24	1.73	4.43	0.17	13.38
甘肃	3.43	23.68	0.46	0.08	0.10	0.08	23.58
四川	8.04	55.24	0.46	4.19	14.50	0.23	40.74
广东	3.40	14.58	0.29	0.07	0.07	0.06	14.51
陕西	4.07	10.70	0.18	0.80	0.82	0.07	9.89
宁夏	0.07	0.91	0.84	0.00	0.00	0.18	0.90
福建	7.51	33.62	0.30	0.16	0.21	0.09	33.41
山西	1.61	4.16	0.17	0.33	0.40	0.08	3.76
湖北	2.38	10.10	0.28	0.01	0.00	0.03	10.10
河南	2.56	13.26	0.35	0.02	0.01	0.04	13.25
重庆	0.62	3.32	0.35	0.25	0.66	0.18	2.66
江苏	0.20	2.23	0.76	0.00	0.00	0.21	2.23
山东	1.79	15.44	0.58	0.00	0.00	0.02	15.44
安徽	1.94	7.67	0.26	0.18	0.14	0.05	7.53
贵州	2.77	12.02	0.29	0.58	1.67	0.19	10.35
湖南	7.17	27.08	0.25	0.16	0.23	0.10	26.86
江西	4.65	17.00	0.24	0.84	1.84	0.15	15.15
浙江	3.82	10.68	0.19	1.01	3.54	0.23	7.14
黑龙江	10.73	32.89	0.20	7.53	25.06	0.22	7.82
吉林	6.66	45.16	0.45	0.27	0.44	0.11	44.72
内蒙古	11.00	63.73	0.39	3.83	5.15	0.09	58.59
河北	0.39	2.51	0.43	1.04	1.58	0.10	0.93
辽宁	3.45	15.86	0.31	0.71	1.29	0.12	14.57
北京	0.06	0.63	0.75	0.00	0.00	0.10	0.62
天津	0.01	0.06	0.74	0.00	0.00	0.21	0.06
海南	0.68	20.31	1.98	0.00	0.00	0	20.31

表 S2 三大类森林植被类型碳汇/碳源总量、面积比较

森林类型	碳汇		碳源		净收支(TgC)
	碳汇量(TgC)	碳汇面积(10 ⁶ ha)	碳源量(TgC)	碳源面积(10 ⁶ ha)	
针叶林	417.40	53.97	49.80	17.04	367.60
阔叶林	445.70	48.85	62.60	12.30	383.10
混交林	16.65	4.47	2.10	3.47	14.55