

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

戴 铭^{1,2}, 周 涛^{1,2*}, 杨玲玲², 贾根锁³

(1. 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875; 2. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029)

摘要: 森林的林龄结构及空间分布是评估区域尺度森林生态系统碳汇潜力的重要参数。以第五次全国森林详查获取的省级优势树种的平均林龄及分布面积为基础, 以同期生长季节的NOAA/AVHRR NDVI遥感数据为辅助, 在空间降尺度统计技术的支持下, 得出了全国8 km分辨率下的森林林龄的定量分布。结果表明: 中国林龄在空间分布具有很大异质性。东南地区的林龄较低, 省平均林龄主要介于20~30年。林龄大于120年的森林主要分布在四川中部及新疆西北部地区。西藏东南部、黑龙江西北部、内蒙古东北部以及云南南部地区的林龄介于两者之间, 其值大多介于70~120年。从全国范围看, 森林的林龄主要介于10~80年, 其面积占森林总面积的85.4%, 其中林龄在20~40年之间的森林面积占35.3%。全国总的平均林龄为40.6年, 标准差为26.6年, 在概率分布上呈现单峰非正态分布。

关键词: 林龄; 森林详查; 降尺度; NDVI; 碳汇

文章编号: 1000-0585(2011)01-0172-13

1 引言

在当前全球变暖背景下, 陆地生态系统碳循环对调控大气CO₂浓度和未来的气候变化起到了非常重要的作用^[1]。森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 其植被与土壤中储存了大量的有机碳, 并通过生态系统的光合作用和呼吸作用参与全球碳循环, 因此, 森林生态系统是影响全球碳循环的一个关键组分^[2,3]。森林生态系统的碳循环动态在很大程度上取决于森林的林龄^[4], 这是决定生态系统碳储量和碳通量的关键因子^[5], 森林与大气之间的碳交换特征随林龄而变化具有显著的林龄效应^[6]。由于遥感技术和碳循环过程模型的快速发展, 区域尺度碳循环研究得到了快速发展^[7]。然而, 受林龄空间分布资料缺乏的限制, 模型模拟的碳循环动态以及森林碳汇量还存在较大的不确定性^[8]。

在已有的研究中, 确定林龄的空间格局特征通常采用以下两种办法。其一是基于森林样点实测的林龄数据, 建立林龄与其他替代指标的经验关系, 并以此来估算森林林龄的空间分布特征^[9~12]。这种方法估算的结果受林龄空间异质性程度、观测样点数及分布、替代指标的精度与可获取性以及经验关系的普适性等多种因素的限制, 到目前为止还鲜有基

收稿日期: 2009-12-07; 修订日期: 2010-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(30970514、40671173、30590384); 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室开放课题

作者简介: 戴铭(1986-), 男, 浙江省开化县人, 研究生, 主要从事遥感监测与森林生态系统碳循环研究。

E-mail: daiming@mail.bnu.edu.cn

* 通讯作者: 周涛(1972-), 湖南冷水江人, 博士, 教授。E-mail: tzhou@bnu.edu.cn

于这种方法确定的全国尺度上的定量的林龄分布图。其二是基于大量森林实测资料估算的全国林龄空间分布^[8]。因此其结果具有最广泛的代表性, 但单独使用该数据集并不能很好地揭示省内各空间格点的林龄差异。

遥感数据(如 NOAA/AVHRR)具有高的空间异质性监测能力^[13], 这在估算森林林龄的空间格局方面具有不可替代的作用。然而, NOAA/AVHRR NDVI 等遥感数据直接反映的是森林林冠的特征, 除林龄外, 不同的森林类型与演替阶段也会显著影响 NDVI 值。虽然研究表明森林的生物量与森林的林龄关系密切^[4, 14], 可以采用遥感数据估算的生物量来间接得到林龄的值^[15], 将其作为估算林龄的替代指标, 但基于遥感数据估算森林生物量本身就是当前研究中具有挑战性的热点之一^[16, 17]。

将反映空间差异的遥感数据与反映地面调查的统计数据相结合, 采用降尺度统计技术定量估算林龄的空间分布是当前一种有潜力的研究方法。降尺度统计方法是一种把大尺度、低分辨率的信息转化为区域尺度、高分辨率信息的方法^[18], 目前主要应用于气候变化方面的研究^[19, 20], 但在生态系统碳循环领域也得到了成功的应用^[21]。Kindermann 等^[21]以 FAO 提供的全球各国森林生物量均值为基础, 并以同期 NPP 和人口密度数据为辅助, 利用降尺度技术估算了全球 0.5 度 \times 0.5 度分辨率的森林生物量空间分布。本研究以第五次全国森林详查获取的省级尺度各森林类型平均林龄及所占面积为基础, 以同期生长季节的 NOAA/AVHRR NDVI 遥感数据为辅助, 采用典型的降尺度方法定量估算全国 8km 分辨率下的森林林龄的空间分布, 并探讨其空间分布特征。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 国家森林资源详查数据 所采用的详查数据来自国家林业局森林资源管理司 2000 年出版的《全国森林资源统计》(1994~1998) 和国家林业局森林资源管理司 1994 年出版的《国家森林资源清查主要技术规定》。资料包括各类森林优势树种的龄级(幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林)、面积、蓄积量、树种(组)划分表和优势树种(组)龄组划分表等。由于这两份数据的详细性和权威性, 因而在计算国家或地区森林林龄空间分布中最具代表性^[4]。

2.1.2 NOAA/AVHRR NDVI 数据 所采用 NOAA/AVHRR NDVI 数据来自于 Global Inventory Modeling and Mapping Studies^[22] (<http://glcf. umiacs. umd. edu/data/gimms>), 图象空间分辨率为 8 km, 时间分辨率为旬。本研究选用生长季节(4~10 月) NDVI 数据, 时段与国家森林资源详查时间相同(1994~1998 年)。在预处理中, 逐月计算多年平均 NDVI 值, 从而获得 1994~1998 年生长季月均 NDVI 图。

2.2 研究方法

本文基于全国森林资源详查数据和生长季节的 NOAA/AVHRR NDVI 遥感数据, 采用降尺度统计方法定量估算全国 8 km 分辨率下的森林林龄的空间分布的技术路线(图 1), 其主要步骤包括:(1) 根据《国家森林资源清查主要技术规定》中的树种(组)划分表和《中国植物志》, 将《全国森林资源统计》林分各优势树种各龄组面积蓄积统计表中各类优势树种分别划分为常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林和混交林五种森林植被类型。并与 1:400 万中国植被图^[23](包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林和混交林五种森林植被类型)和 1994~1998 年生长季月均 NDVI 图相

匹配,从而确定《全国森林资源统计》中各省各森林类型所属像元位置以及各像元对应 NDVI 值。(2) 利用累积概率密度分布的理论,建立 NDVI 与不同森林类型各龄组之间的相互关系,根据各省相同森林类型不同龄组所占面积的权重确定对应区域各龄组间 NDVI 的临界值,从而确定不同龄组的像元数及空间位置。(3) 根据《国家森林资源清查主要技术规定》中优势树种(组)龄组划分表和各省相同森林类型不同龄组所占面积的权重,计算各省份各森林类型在各龄组中的平均林龄。(4) 针对各个省,将各森林类型各林龄组的平均林龄与对应像元的 NDVI 值相结合,确定每个对应像元的林龄值。

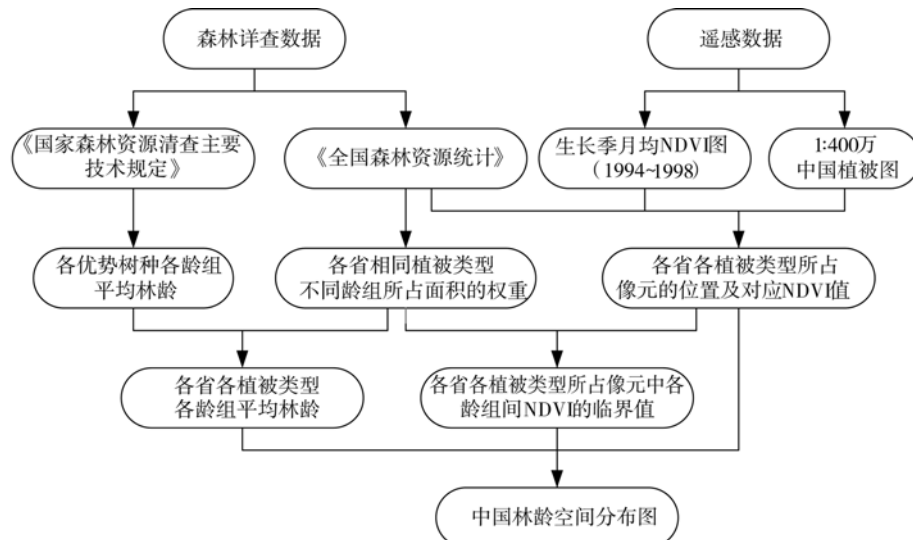


图 1 估算中国林龄空间分布的技术路线图

Fig. 1 Flow chart for mapping forest ages

2.2.1 分析确定各省各森林类型不同龄级 NDVI 临界值 研究表明森林的林龄与生物量以及 NDVI 之间存在一定的正相关性^[15, 24, 25]。即随着林龄的增大 NDVI 值整体上也随之增大,但对于不同类型的森林或相同类型但不同演替阶段(不同林龄组)的森林来说,NDVI 值随林龄的增大而增大的幅度有所不同。由于目前 NDVI 与林龄的关系并不存在统一的公式可供借鉴。因此,本文的策略是先以省为单元(目的是与省级尺度的森林详查资料相对应),再按森林类型和林龄组进行分区,然后再针对各分区分别建立 NDVI 与林龄的关系。确定各省各森林类型下不同林龄组的 NDVI 临界值的方法如下:(1) 根据《全国森林资源统计》提供的数据统计各省各森林类型幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林及过熟林各龄组面积以及该龄组面积占该省该森林类型总面积的比例;(2) 对该省份对应森林类型的 NDVI 像元值排序;(3) 根据(1)中各林龄组面积所占比例在排序后的 NDVI 序列中确定各龄级间 NDVI 的临界值,使位于临界值之间的 NDVI 像元数所占比例与对应林龄组面积所占比例相等。图 2 以黑龙江省为例示例了落叶阔叶林(浅灰色像元)不同林龄组间 NDVI 临界值的确定方法。

2.2.2 确定各省份各森林类型下不同龄组的平均林龄 根据国家林业局森林资源管理司出版的《国家森林资源清查主要技术规定》中计算平均值得到不同优势树种在不同地区、

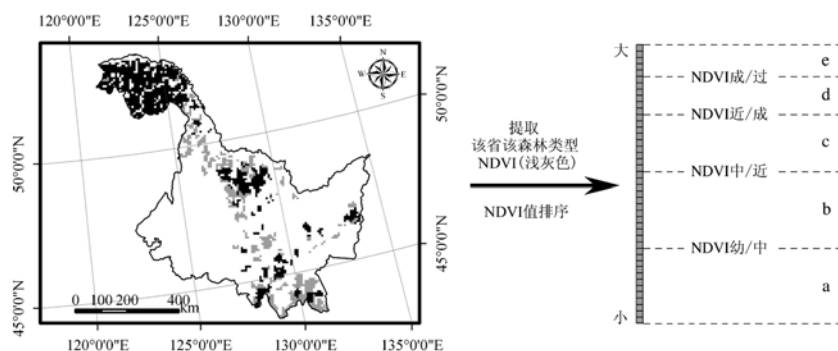


图 2 森林不同龄组间 NDVI 临界值的确定方法

Fig. 2 Determining NDVI thresholds among different forest age classes

图中浅灰色像元表示落叶阔叶林，灰色像元表示其他森林类型；a~e 分别表示幼龄林~过熟林五个林龄组森林面积所占的比例（a=幼龄林面积/AREA；b=中龄林面积/AREA；c=近熟林面积/AREA；d=成熟林面积/AREA；e=过熟林面积/AREA；AREA 为该省落叶阔叶林总面积）；NDVI 幼/中、NDVI 中/近、NDVI 近/成和 NDVI 成/过分别表示该省落叶阔叶林中相应龄组间 NDVI 的临界值。

不同起源、不同龄级的各自平均年龄。并整合《全国森林资源统计》林分各优势树种各龄组面积蓄积统计表中的树种类型和《国家森林资源清查主要技术规定》优势树种（组）龄组划分表的树种类型。然后综合人工林起源和天然林起源运用公式（1）统计各种优势树种在北、南方不同龄组的平均年龄：

$$f(c_i) = (c_{\text{天然林}} + c_{\text{人工林}}) / 2 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

其中， $f(c_i)$ 表示某一树种某一龄组的平均林龄； $c_{\text{天然林}}$ 表示某一优势树种天然林平均林龄； $c_{\text{人工林}}$ 表示某一优势树种人工林平均林龄；其中 $i=1, 2, 3, 4$ 分别表示幼龄林组、中龄林组、近熟林组和成熟林组。

对于不同优势树种过熟林的平均年龄取《国家森林资源清查主要技术规定》中规定的最低年龄加 10 年后的数值（《国家森林资源清查主要技术规定》规定的龄级划分范围大多数是 10）。然后将公式（1）代入公式（2）中统计针叶混交林、阔叶混交林、针阔混交林在北、南方各龄组的平均林龄：

$$g(t_{ki}) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f(C_{jki}) \quad (t = 1, 2, 3) \quad (k = 1, 2) \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

其中 $t=1, 2, 3$ 分别表示针叶混交林、阔叶混交林、针阔混交林； $k=1, 2$ 分别表示北方和南方； $i=1, 2, 3, 4, 5$ 分别表示幼龄林组、中龄林组、近熟林组、成熟林组和过熟林组； $g(t_{ki})$ 表示 t 混林 k 地区 i 龄组的平均林龄； j 表示优势树种（组）龄组划分表中 7 大类优势树种属于 t 型混交林的大类； m 表示属于 t 型混交林 j 类的数量；得到如下各优势树种不同龄组平均林龄表（表 1）：

以秦岭淮河为界确定中国南方和北方的省份：

北方：北京市、天津市、黑龙江省、辽宁省、吉林省、内蒙古自治区、河北省、山西省、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区/新疆维吾尔自治区、河南省、山东省、青海省。

南方：云南省、四川省（包含重庆市）、贵州省、湖北省、湖南省、安徽省、江西省、

江苏省、浙江省、上海市、福建省、西藏自治区、广东省、广西壮族自治区、海南省。

表 1 优势树种不同龄组平均林龄表
Tab. 1 The average age of different forest age classes of dominant tree species

树种	地区	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
红 松、云 杉、柏 木、紫 杉、铁 杉、油杉	北方	25	65	90	120	150
	南方	15	40	60	85	110
落叶松、冷杉、樟子松、赤松、黑松	北方	15	42.5	62.5	85	110
	南方	15	37.5	52.5	75	100
油松、马尾松、云南松、思茅松、华山松、高山松	北方	12.5	32.5	45	60	80
	南方	7.5	20	30	45	65
杨、柳、桉、檫、泡桐、木麻黄、楝、枫杨、相思、软阔、桐类	北方	5	12.5	18	25	40
	南方	2.5	8	12.5	20	35
桦、榆、木荷、枫香、珙桐	北方	12.5	32.5	45	60	80
	南方	7.5	22.5	35	50	70
栎、柞、楮、栲、樟、楠、榎、水、胡、黄、硬阔	南北	15	40	57.5	80	105
杉木、柳杉、水杉	南方	5	15	22.5	30	46
针阔混交林	北方	12.5	33.3	47.1	63.3	84.3
	南方	9.5	25.8	38.1	54.4	75.1
针叶混交林	北方	17.5	46.7	65.8	88.3	113.3
	南方	10.6	28.1	41.3	58.8	80.3
阔叶混交林	北方	7.5	20	28.5	38.3	55.3
	南方	8.3	23.5	35	50	70

2.2.3 降尺度统计各像元具体林龄值 根据《全国森林资源统计》省级尺度的林分各优势树种各龄组面积蓄积统计表中各优势树种及其所占面积进行加权求各省各森林类型各龄组的平均林龄，如公式（3）所示：

$$mean_{pgi} = \sum_{z=1}^m h_{zi} \times (area_{pgzi} / total_{pgi}) (p = 1, 2, 3, \cdots n) (g = 1, 2, 3, 4, 5) (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

其中， p 表示不同省份； n 表示省份总数； g 表示五大类森林类型（常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林和混交林）； $i=1, 2, 3, 4, 5$ 分别表示幼龄林组、中龄林组、近熟林组、成熟林组和过熟林组； $mean_{pgi}$ 表示 p 省份 g 森林类型 i 龄组的平均林龄； z 表示优势树种； m 表示优势树种的总数； h 表示表 1 中树种平均林龄； $area_{pgzi}$ 表示 p 省份 g 森林类型 z 优势树种 i 龄组所占面积； $total_{pgi}$ 表示 p 省份 g 森林类型 i 龄组所占总面积。

由于各省各森林类型各龄组像元组中的 NDVI 值的范围存在差异，在估算像元林龄之前，需要先对各省各森林类型各龄组像元组中的 NDVI 值进行比例变换。然后再利用比例变换后的森林 NDVI 和对应区域的平均林龄相结合，将森林详查资料统计出的省级尺度各森林类型各龄组的平均林龄数值降尺度到对应区域每个像元具体林龄数值：

$$age_{x(pgi)} = mean_{pgi} + \left(\frac{NDVI_{x(pgi)} - NDVI_{min(pgi)}}{NDVI_{max(pgi)} - NDVI_{min(pgi)}} \times 2 - 1 \right) \times rag \quad (4)$$

其中, x 表示某一像元; $NDVI_{x(pgi)}$ 表示 p 省 g 森林类型 i 龄组的像元中某一像元的 NDVI 数值; $NDVI_{max(pgi)}$ 和 $NDVI_{min(pgi)}$ 分别表示 p 省 g 森林类型 i 龄组的像元中 NDVI 的最大值和最小值; $age_{x(pgi)}$ 表示 p 省 g 森林类型 i 龄组中像元 x 林龄值; rag 为各林龄组的林龄极差的一半 [$rag=0.5 \times (\text{最大林龄} - \text{最小林龄})$], 当龄组的平均林龄大于 10 年时 ($mean_{pgj} > 10$) 时, 依据《国家森林资源清查主要技术规定》取常数 10, 当龄组的平均林龄小于 10 年时 ($0 < mean_{pgj} \leq 10$), rag 取常数 $mean_{pgj} - 1$ (假设幼龄林最低林龄为 1)。

2.2.4 特殊处理 个别省份内详查数据森林类型的种类与 1:400 万中国植被图中该省份的森林类型的种类不完全相符的情况时, 只计算两个资料中该省份内共同拥有的森林类型。因此, 图中共有 541 个像元未处理, 均为混交林。其中福建 20 个像元、四川 296 个像元、西藏 207 个像元、浙江 18 个像元; 分别占各省总像元数的 4.02%、11.51%、15.83%、5.81%。因为四川和西藏两省缺失林龄数值的像元较大, 因此本文分别将四川和西藏两省具有林龄数值像元的平均值分别赋入四川的 296 个像元和西藏的 207 个像元。福建和浙江两省总缺失林龄数值的 38 个像元按缺失值处理。

《中国植被图》中显示北京仅拥有落叶阔叶林分布的像元, 海南仅拥有常绿阔叶林分布的像元。而《全国森林资源统计》(1994~1998) 中北京落叶阔叶林和海南常绿阔叶林的面积分别仅占本市/省总面积的 22.13% 和 28.05%。因此, 本研究将《全国森林资源统计》中北京优势树种全部当作落叶阔叶林处理, 而海南优势树种全部当作常绿阔叶林处理。

3 结果与讨论

3.1 结果分析

图 3 为利用降尺度技术处理流程图。将第五次森林详查资料和《国家森林资源清查主要技术规定》获取的省级尺度林龄均值, 降尺度至 8km 分辨率林龄空间分布。图 4 为中国林龄的空间分布格局结果图。据《全国森林资源统计》(1994~1998) 统计全国林分总面积为 $12919.94 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。图 4 中森林总覆盖面积为 $11996.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 匹配精度达 92.91%。

中国林龄空间分布有很大差异。中国 1994~1998 年间森林林龄空间分布图 (图 4) 中显示我国森林植被的林龄普遍偏低。全国森林平均林龄为 40.6 年, 标准差为 26.6 年。林龄大于 120 年的森林主要分布在四川中部、新疆西北部地区。东南地区的林龄普遍偏低, 省平均林龄介于 20~30 年, 但也有少部分东南地区存在成熟林和过熟林。西藏东南部、黑龙江西北部、内蒙古东北部以及云南南部地区的林龄介于上述两者之间, 集中在 70~120 年之间。平均林龄最高的省份西藏达到 77.6 年。整体趋势上看, 中国森林的林龄有明显的从西部向东部过渡的趋势。

森林龄级各自所占面积有很大差异 (图 5)。对不同林龄数值所占的面积进行 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验, 结果显示不同年龄阶段像元数正态分布显著性概率 $P=0 < 0.05$ 。因此可以得出结论, 中国范围内林龄的空间分布格局, 呈单峰非正态分布。其中 20~40 年之间的森林面积最大, 占总面积的 35.3%。分别是林龄在 11~20 年之间和 40~60 年之间森林面积的 1.5 倍和 2 倍。而 120 年以上的森林面积只占 0.4%。总体来说, 10~80 年之间的森林面积占了总面积的 85.41%。

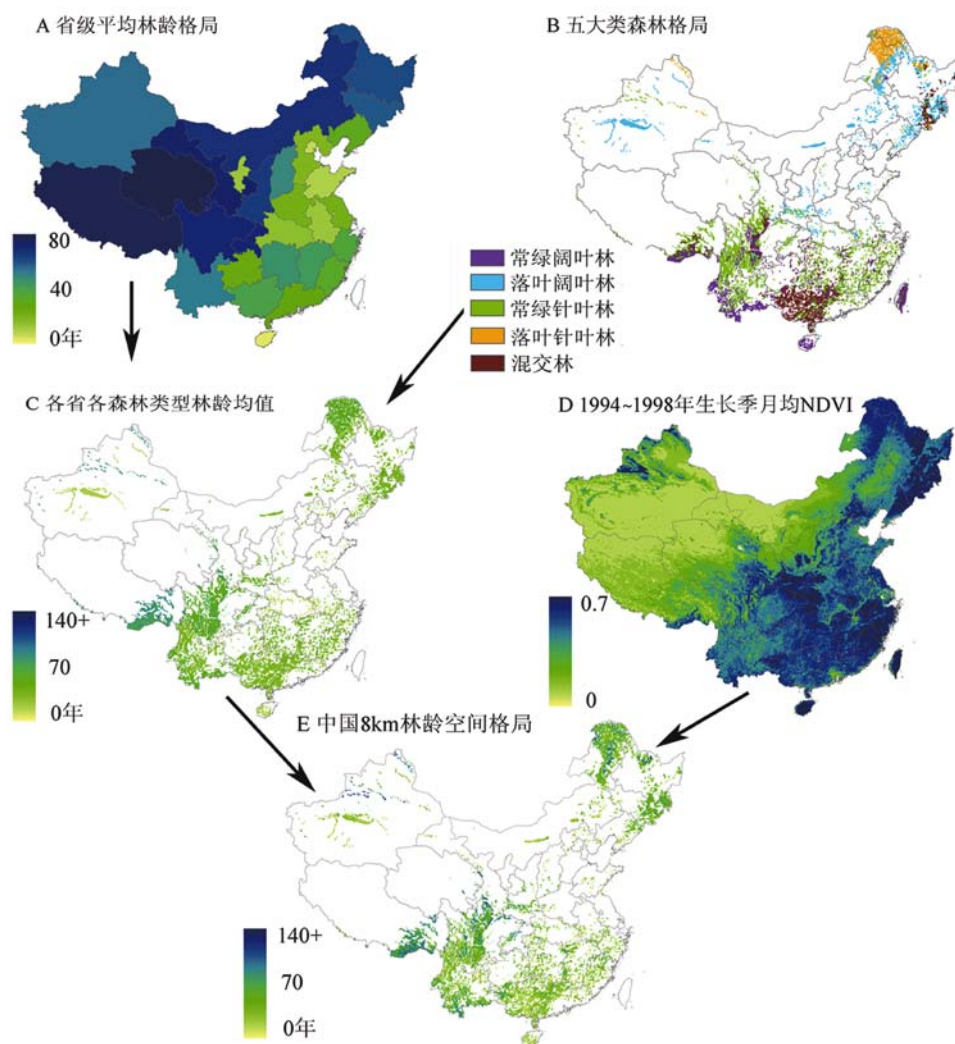


图 3 降尺度技术流程示意图

Fig. 3 Downscaling provincial-level values to 8 km values

图中 A 表示根据第五次森林详查资料获取的省级尺度的林龄均值；B 表示 1 : 400 万中国植被图中五大森林类型的分布；C 表示由 A 和 B 相结合得到的各省各森林类型的平均林龄；D 表示与森林详查同期的 NOAA/AVHRR 的多年月均 NDVI；E 表示由 C 和 D 相结合降尺度至 8 km 分辨率的全国林龄的空间分布。

不同森林植被类型的林龄结构有很大差异 (图 6)。1~10 年龄组中落叶阔叶林所占面积最大, 占 46%。11~40 年龄组中常绿针叶林占 42.2%。41~60 年龄组中五种森林类型所占比例相近。61~100 年龄组中混交林只占 5.25%。而 120 年以上的森林中主要为常绿针叶林, 而其他森林类型几乎无分布。常绿阔叶林林龄在 41~60 年之间的面积最大, 达 $4.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。21~80 年之间的常绿阔叶林森林面积占总常绿阔叶林面积的 67.4%。落叶阔叶林林龄在 21~40 年之间的面积最大, 达到 $11.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。11~60 年之间的落叶阔叶林森林面积占总落叶阔叶林面积的 84.1%。常绿针叶林林龄呈现双峰非正态分布,

其中林龄在 10~40 年之间的常绿针叶林面积达 $30.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占总常绿针叶林面积的 62.9%。落叶针叶林林龄在 21~40 年之间面积最大，达 $5.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中 21~60 年之间的落叶针叶林面积占总落叶针叶林面积的 64.3%。混交林林龄在 20~40 年之间面积最大，占总混交林面积的 45.8%。

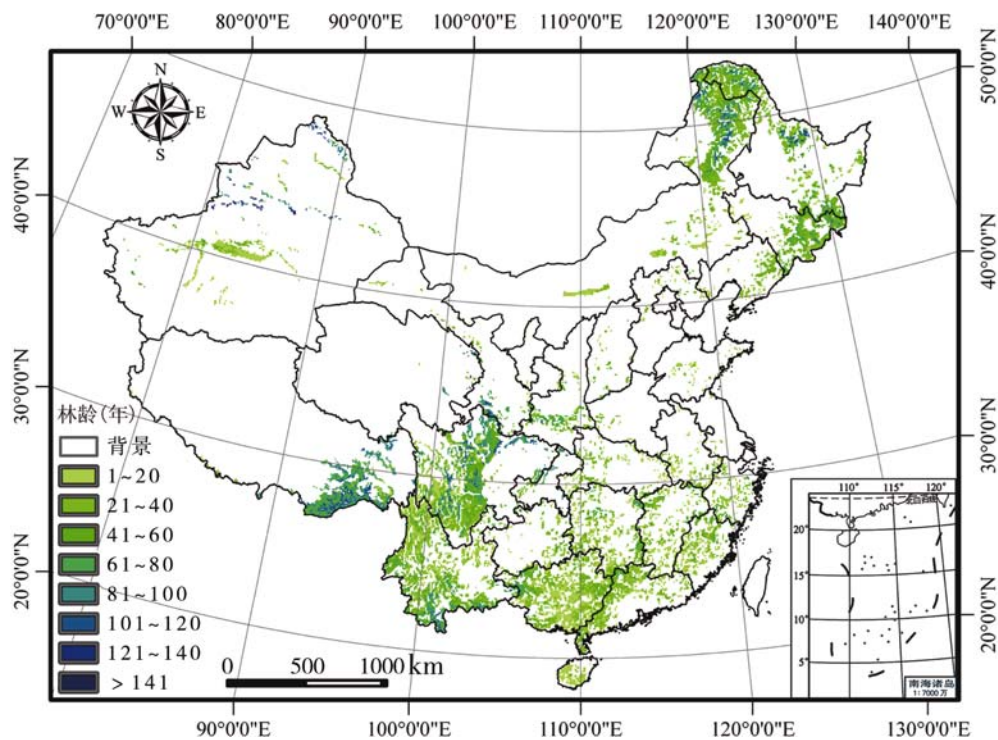


图 4 中国 1994~1998 年间森林林龄空间分布图（台湾和西藏控制线以外缺数据）

Fig. 4 Spatial pattern of forest ages in China during 1994—1998

中国绝大多数森林的林龄整体偏低。《全国森林资源统计》（1994~1998）统计全国林分面积中幼林面积 $4758.26 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、中龄林面积 $4430.43 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、近熟林面积 $1448.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、成熟林面积 $1419.38 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、过熟林面积 $863.15 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ；成熟林和过熟林占总森林面积 17.67%。如果将林龄大于 65 年森林植被定义为成熟林^[26]，图 4 中大于 65 年的森林面积占总森林面积的 17.36%。

中国林龄结构整体上不合理，有研究表明过去的 20 多年里成熟林的面积不但没有增加，反而有减少的趋势^[15]。图 5 揭示了我国 60 年以下的森林面积占了全部森林

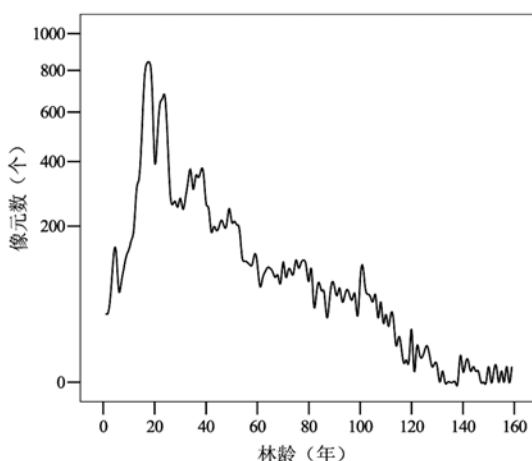


图 5 中国森林林龄频数图

Fig. 5 Distribution of forest stand age in China

面积的 80% 左右。据《全国森林资源统计》(1994~1998) 统计, 全国天然林面积 $10696.54 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 占全国森林面积的 69.62%。全国人工林面积 $4666.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占有林地面积的 30.38%。近百年来, 森林植被受到很大的人类活动干扰, 干扰强度越大则幼龄林所占的成分越大^[4], 但从另一个角度看, 随着我国森林的成熟和发展, 我国森林将是一个巨大的潜在碳汇^[4]。

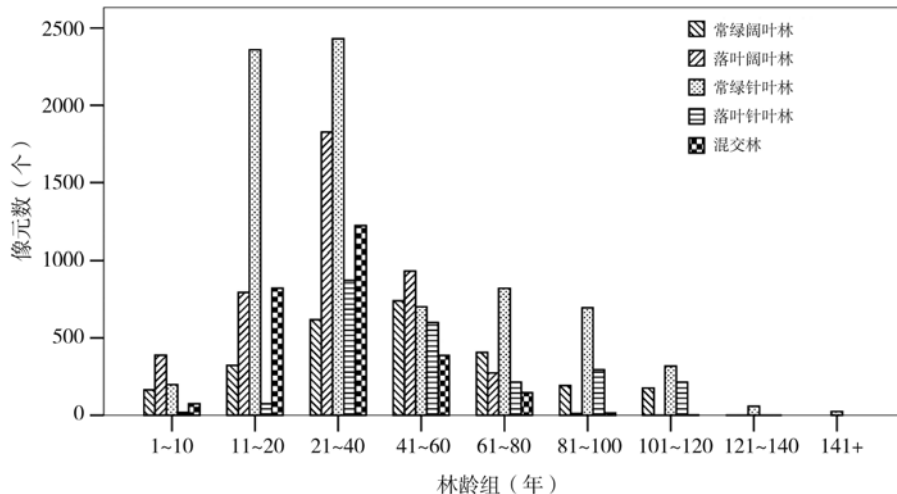


图 6 中国各森林类型林龄分组频数图

Fig. 6 Pixel counts for each stand age class based on different forest types

3.2 省级尺度对比验证

森林碳储量与林龄关系密切, 幼年林对碳的固定能力比较低, 随着年龄的增长森林固定碳的能力逐渐增强, 直到林木成熟期达到最大^[4,14]。可将中国 (1994~1998) 的森林生物量密度各省区平均数值^[27]与图 4 中各省平均林龄数值进行线性回归分析 (图 7)。

方精云等^[27]进行研究, 共有北京、上海、天津 3 个直辖市和 27 个省份 (台湾无数数据) 森林生物量密度各省/直辖市平均数值。由于图 4 的像元的分辨率为 8km, 在上海和天津无森林像元。因此本研究选取了共 28 个省、直辖市数据建立线性关系式。其表达式为 $y=0.5927x+8.9753$, $R^2=0.4214$ 。这表明本研究估算的森林林龄在省级尺度上与森林生物量密度存在显著的线性关系。

3.3 样地尺度观测数据验证

本文的研究结果与全国 1266 块森林样地的实测林龄数据^[28]进行了对比, 同时还与诸多研究者的观测结果进行对比验证 (表 2)。依据经纬度将样地实测林龄数据与本研究的结果进行匹配。线性回归分析表明, 本研究估算的林龄与罗天祥等^[28]实测的林龄存在显著的线性关系 (图 8): $y=0.6354x+42.019$ ($p<0.05$)。但由于罗天祥的数据为样地尺度实测值, 其样地面积仅为 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 或 $20\text{m} \times 20\text{m}$, 远低于本研究的 $8\text{km} \times 8\text{km}$ 分辨率, 因此, 效果略差于省级尺度林龄与碳密度的关系 (图 7)。

3.4 不确定性原因分析

文中林龄估算的不确定性主要有以下几方面的问题:

(1) 在过熟林的平均年龄估算中, 由于缺乏更多森林指标的约束。本研究仅根据《国家森林资源清查主要技术规定》(1994) 规定的龄级划分范围大多数是 10 年, 而将《国家森林资源清查主要技术规定》(1994) 规定的各树种过熟林最低年龄加 10 年, 作为各个树种过熟林的平均年龄, 这种做法可能会低估部分森林年龄大于 200 年的地区, 但中国森林林龄空间分布格局总体趋势不会受到影响。因此如何更好地估算森林高龄区域林龄的数值还有待进一步深入的研究。

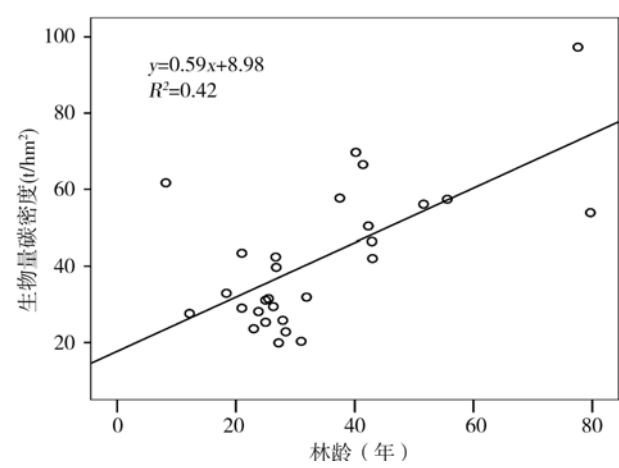


图 7 省级森林平均生物量碳密度与林龄相关性
Fig. 7 The correlation between forest biomass C density and forest stand age at provincial level

表 2 降尺度估算值与观测值对比

Tab. 2 Comparison of downscaling measured and observed forest ages

编号	经度 (°)	纬度 (°)	地域位置	观测值 (年)	估算值 (年)	参考文献
1	128.88	47.18	—	25	20	[29]
2	102.8	31.68	—	9	20	[30]
3	102.8	31.68	—	10	20	[30]
4	102.8	31.68	—	10	20	[30]
5	127.57	45.27	—	24	24	[31]
6	127.57	45.27	—	21	24	[32]
7	108.8	36.8	陕西志丹	20	4	[33]
8	109.8	35.5	陕西黄龙	22	15	[33]
9	109.2	35.5	陕西黄陵	25	41	[33]
10	109.32	34.17	陕西蓝田	21	17	[33]
11	110.2	34	陕西洛南	21	23	[33]
12	108.3	33.3	陕西宁陕	20	42	[33]
13	112.9	22.7	广东鹤山	14	15	[34]
14	119.6	29.1	浙江金华	20	18	[35]
15	119.9	28.4	浙江丽水	22	21	[35]
16	119.9	28.4	浙江丽水	17	21	[35]
17	109.7	26.8	湖南会同	22	19	[36]
18	103.9	31.3	四川彭州	26	23	[37]
19	105.35	31.23	四川盐亭	30	30	[38]
20	105.35	31.23	四川盐亭	25	30	[38]

(2) 病虫害和森林火灾等因素可能会对遥感观测的 NDVI 值产生影响, 从而影响森林林龄的估算。但 20 世纪中国范围内的病虫害或火灾面积的实测或模拟资料非常少, 很

难做为一个参考变量来更好地约束中国森林林龄空间分布的估算。因此如何在估算森林林龄的空间分布上加上病虫害和森林火灾等因素的约束,还有待进一步量化研究。如果能将 1994~1998 年的土地利用变化考虑上能使研究结果的精度进一步提升。

(3) 如果把天然林和人工林的面积比重做为一个因子加入在各省各森林植被类型各优势树种的平均林龄计算中,能使本研究的精度进一步上升。而本文的策略是采用了《国家森林资源清查主要技术规定》优势树种(组)龄组划分表这份权威资料反推的方法,计算出了表 1(优势树种不同龄组平均林龄表)。这个方法可以认为是一个全国范围内折中的处理办法,森林林龄空间分布格局总体趋势不会受到影响。相信随着资料的逐步完善,森林林龄估算的精度会进一步上升。

4 结论

林龄的空间分布有很大差异。从整体趋势上我国森林植被的林龄普遍偏低。全国范围内森林平均林龄为 40 年左右,大于 120 年的森林主要分布在四川中部、西藏西北部地区。东南部分省的林龄平均林龄普遍为 20~30 年。黑龙江西北部地区、内蒙古东北部地区以及云南南部地区的林龄介于上述两者之间,集中在 70~120 年之间。平均林龄最高的省份西藏达到 77.6 年。森林龄级各自所占面积有很大差异,呈单峰非正态分布。其中 20~40 年之间的森林面积最大,占总面积的 35.3%。而 120 年以上的森林面积只占 0.4%。同时,不同森林类型的林龄结构有很大差异。由此表明,近百年来,人类活动对森林的干扰较大,中国林龄结构整体偏年轻。中国林龄空间分布的研究为模拟我国森林生态系统的碳源、碳汇分布特征提供了重要的科学基础。

致谢: 北京师范大学江源教授对森林树种归类提供了诸多帮助;中科院地理资源所王绍强研究员对研究方法提出了许多有益的指导和建议,在此致以诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, *et al.* Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. New York: Cambridge University Press, 2007. 499~587.
- [2] Goodale C L, Apps M J, Birdsey R A, *et al.* Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications*, 2002, 12(3): 891~899.
- [3] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U. S. carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285: 574~578.

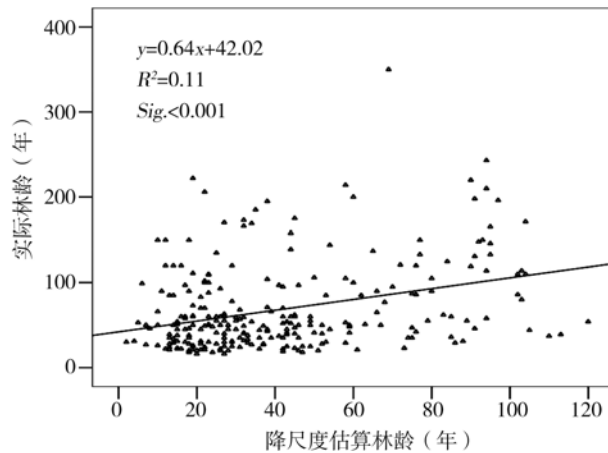


图 8 样地实测林龄与降尺度估算林龄相关性
Fig. 8 The correlation between measured and downscaling estimated forest stand age

- [4] 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. 生态学报,2000,20(5):733~740.
- [5] Song C H,Woodcock C E. A regional forest ecosystem carbon budget model:Impacts of forest age structure and landuse history. Ecological Modelling,2003,164(1):33~47.
- [6] 王兴昌,王传宽,于贵瑞. 基于全球尺度相关的森林碳交换的时空格局. 中国科学(D辑),2008,38(9):1092~1102.
- [7] Cramer W,Kicklighter D W,Bondeau A, *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP):Overview and key results. Global Change Biology,1999,5:1~15.
- [8] Wang S Q,Chen J M,Ju W M, *et al.* Carbon sinks and sources in China's forests during 1901~2001. Journal of Environmental Management,2007,85:524~537.
- [9] Ni J,Zhang X S,Scurlock J M O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests. Annals of Forest Science,2001,58(4):351~384.
- [10] Zhao M,and Zhou G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forest in China based on forest inventory data. Forest Ecology and Management,2005,207:295~313.
- [11] Neeff T, Lucas R M,Santos J R D, *et al.* Area and age of secondary forests in Brazilian Amazonia 1978~2002: An empirical estimate. Ecosystems, 2006, 9:609~623.
- [12] 王殿中,孙国清,过志峰. 天然林林龄的模拟估算及案例. 生态环境,2008,17(5):1999~2003.
- [13] 张月丛,赵志强,李双成,等. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势. 地理研究,2008,27(4):745~754.
- [14] Kristiina A V,Robert L E,Charles C G. Biomass and nutrient concentrations of sporocarps produced by mycorrhizal and decomposer fungi in *Abies amabilis* Stands. Oecologia (Berl),1981,50:170~175.
- [15] 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. Journal of Geophysical Research—Biogeoscience,2005,110, G01006, doi:10.1029/2005JG000014.
- [16] 李崇贵,赵宪文,李春干. 森林蓄积量遥感估测理论与实现. 北京:科学出版社,2006.
- [17] 杨存建,刘纪远,黄河,等. 热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析. 地理研究,2005,24(3):473~479.
- [18] 赵芳芳,徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析. 气象学报,2007,65(4):653~662.
- [19] Wetterhall F,Halldin S,Xu C. Statistical precipitation downscaling in central Sweden with the analogue method. Journal of Hydrology,2005,306:174~190.
- [20] Wilby R L,Hay L E,Leavesley G H. A comparison of downscaled and raw GCM output:Implications for climate change scenarios in the San Juan River basin,Colorado. Journal of Hydrology,1999,225:67~91.
- [21] Kindermann G E,McCallum I, Fritz S, *et al.* A global forest growing stock,biomass and carbon map based on FAO statistics. Silva Fennica,2008,32(3):387~396.
- [22] Tucker C J,Pinzon J E,and Brown M E. Global Inventory Modeling and Mapping Studies, NA94apr15b.n11—V1g, 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland. <http://glcf. umiacs. umd. edu/data/gimms>,1994—04—15, 2004.
- [23] 中国科学院植物研究所. 中国植被图. 北京:中国地图出版社,1979.
- [24] Pan Y,Luo T,Birdsey R, *et al.* New estimates of carbon storage and sequestration in China forests:Impacts of age and method in inventory-based carbon estimation. Climate Change,2004,67:211~236.
- [25] Dong J,Kaufmann R K,Myneni R B, *et al.* Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass:Carbon pools,sources and sinks. Remote Sensing of Environment,2003,84:393~410.
- [26] Noormets A,Chen J,Crow T R. Age-dependent changes in ecosystem carbon fluxes in managed forests in northern Wisconsin. Ecosystems,2007,10:187~203.
- [27] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报,2001,43(9):967~973.
- [28] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 北京:中国科学院自然资源综合考察委员会,博士学位论文,1996.
- [29] 白云庆. 人工落叶松林生物量估算. 东北林学院学报,1982,(增刊):29~37.
- [30] 李学明. 日本落叶松的生物产量测定. 四川林业科技,1984,5(1):27~29.
- [31] 丁宝永,刘世荣,蔡体久. 落叶松人工林群落生物生产力的研究. 植物生态学与地植物学学报,1990,14(3):226~236.

- [32] 刘世荣,柴一新,蔡体久,等. 兴安落叶松人工群落生物量与净初级生产力的研究. 东北林业大学学报,1990,18(2):40~46.
- [33] Xiao Y. Comparative studies on biomass and productivity of *Pinus tabulaeformis* plantations in different climatic zones in Shaanxi Province. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*,1990,14(3):237~246.
- [34] 彭少麟,余作岳,张文其,等. 鹤山亚热带丘陵人工林群落分析. 植物生态学与地植物学学报,1992,16(1):1~10.
- [35] 江波,袁位高,朱光泉,等. 马尾松、湿地松和火炬松人工林生物量与生产结构的初步研究. 浙江林业科技,1992,12(5):1~8.
- [36] 黄宇,冯宗炜,汪思龙,等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报,2005,25(12):3146~3154.
- [37] 段文霞,朱波,刘锐,等. 人工柳杉林生物量及其土壤碳动态分析. 北京林业大学学报,2007,29(2):55~59.
- [38] 吴鹏飞,朱波,刘世荣,等. 不同林龄桧—柏混交林生态系统的碳储量及其分配. 应用生态学报,2008,19(7):1419~1424.

Spatial pattern of forest ages in China retrieved from national-level inventory and remote sensing imageries

DAI Ming^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2}, YANG Ling-ling², JIA Gen-suo³

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia (RCE-TEA), CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: The structure and spatial distribution of forest age are important parameters for assessing carbon sequestration potential of forest ecosystems at regional scale. In this study, we tried to estimate those parameters based on survey data of the average forest age and area of dominant tree species retrieved from detailed investigation of the fifth national forest at provincial level, along with the growing season NDVI data derived from NOAA AVHRR sensors in the same period. We then analyzed the spatial patterns of forest ages in China with remote sensing downscaling techniques. The results indicate that the spatial distribution of forest ages showed significant heterogeneity. The forest age of southeast China was lower than that of rest of the country, with average values ranging from 20 to 30 years. The forests aged over 120 years are mainly distributed in central Sichuan and northwestern Xinjiang. And the forest ages of the southeastern Tibet, northwestern Heilongjiang, northeastern Inner Mongolia and southern Yunnan are mostly between 70—120 years. From the national-level perspective, the main forest age is ranged from 10 to 80 years, with their area accounting for 85.4% of the total forest area. The area of forest aged 20—40 years accounted for 35.3% of the total forest area. The average forest age was 40.6 years in China, whose standard deviation is 26.6 years. As for the probability, Chinese forest ages showed a single peak of abnormal distribution.

Key words: forest age; national-level inventory; downscaling; NDVI; carbon sink