

森林及其产品的固碳量研究

赵迪

东北大学秦皇岛分校数学与统计学院, 河北 秦皇岛

收稿日期: 2022年3月1日; 录用日期: 2022年4月4日; 发布日期: 2022年4月11日

摘要

近年来, 人们愈发注重生态环境的保护, 提出了碳中和的概念, 并且大力研究碳封存等先进技术。本文通过模拟森林的自然生长过程、凋落物的降解过程以及砍伐树木制成的木制品使用过程, 分析了一段时间内森林及其产品的总固碳量变化情况。并且, 将模型应用于法国各个地区, 得出了100年后的固碳量变化情况。根据固碳量变化情况, 可以制定合理的砍伐策略, 以获取更大的收益。

关键词

碳封存, 森林固碳, 砍伐策略, 环境保护

Studies on Carbon Sequestration by Forests and Their Products

Di Zhao

Faculty of Mathematics and Statistics, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao Hebei

Received: Mar. 1st, 2022; accepted: Apr. 4th, 2022; published: Apr. 11th, 2022

Abstract

In recent years, people have paid more attention to ecological protection, put forward the concept of carbon neutrality, and vigorously researched advanced technologies such as carbon sequestration. In this paper, we analyze the total carbon sequestration of forests and their products over time by simulating the natural growth process of forests, the degradation process of litter, and the use of wood products made from felled trees. Furthermore, the model was applied to various regions of France to derive the changes in carbon sequestration after 100 years. Based on the change in carbon sequestration, a reasonable logging strategy can be developed to obtain greater benefits.

Keywords

Carbon Sequestration, Forest Conditioning, Felling Strategy, Environmental Protection

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 问题背景

习近平总书记在 2005 年提出“绿水青山就是金山银山”，这句话强调了森林对于人们的重要性。近年来，随着温室气体(如 CO_2 、 CH_4 等)的大量排放，全球气候变暖，引发了冰川融化、土地荒漠化等严重的生态危机，生态环境问题开始备受关注。图 1 展示了人均碳排放量。森林是减缓气候变化的一个重要组成，森林可以将二氧化碳封存在植物和树木生产的产品中，如图 2 所示，这个过程被称为碳封存。

然而，随着森林的成长，释放的二氧化碳将与封存的二氧化碳量相等，甚至更多。此时森林将会变为碳源，不利于环境保护。通过砍伐森林，可以防止这种情况的产生，因此，如何制定合理的砍伐策略具有重要的意义[1]。



Figure 1. Carbon emission per capita

图 1. 人均排碳量

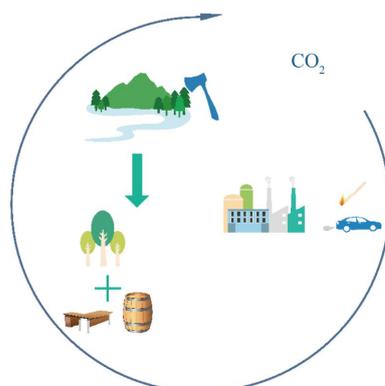


Figure 2. Carbon sequestration

图 2. 碳循环过程

2. 森林及其产品固碳量衡量模型

本文将模型分为三个部分：生物量模块、土壤模块和砍伐模块。生物量模块可以计算树木的固碳量，土壤模块用于计算凋落物的固碳量，砍伐模块用于计算木制品的固碳量。

2.1. 生物量模块

树木的固碳量是整片森林固碳量的主要部分，因此衡量树木的固碳量是最重要的。由于不同树木的生物特征差别较大，因此我们选择最有代表性的落叶林和针叶林作为树木的种类[2]。

生物量模块使用森林面积和碳萃取量作为输入数据。将一片森林分为落叶林区域和针叶林区域，分别计算固碳量，以增加结果的合理性。模块计算两个指标：

净初级生产力(NPP)

净初级生产力表示树木所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分[3]。它可以通过下式进行估计[4]

$$NPP = r \cdot B \cdot \left(1 - \frac{B}{K}\right) \quad (1)$$

其中 r 表示森林的内增长率， B 表示现存的固碳量， K 为环境承载力。

固碳量变化量(B)

固碳量的变化情况与一段时间内的凋零量有关。这个变化情况可以使用微分方程表示[4]

$$\frac{dB}{dt} = NPP - \sum k_i \cdot \varepsilon_i \cdot B \quad (2)$$

其中 ε_i 代表树木不同部分的比例， k_i 代表树木不同部分的自然损失率，具体数值见表 1。

Table 1. (a) Proportion of different organs; (b) Natural losses from biomass to litter

表 1. (a) 树木不同部分所占比例；(b) 不同部分的自然损失率

(a)		
	落叶林	针叶林
树干	0.67	0.60
枝干	0.21	0.26
主根	0.09	0.07
细根	0.01	0.01
树叶	0.01	0.05
(b)		
	落叶林	针叶林
树干	0.0087	0.0043
枝干	0.025	0.027
主根	0.025	0.027
细根	0.87	0.87
树叶	1	0.2

根据上述方程可以计算出 $\frac{dB}{dt}$ ，它代表一年的固碳量增长量，通过迭代这个过程，可以得到一段时

间的固碳量变化情况。

2.2. 土壤模块

一片森林中含有大量的凋落物，包括落叶和枝干等，这些凋落物中封存了大量的碳，但会随着时间分解而释放，因此模拟这一过程对估算森林固碳量也十分重要。

本文将凋落物分为四种：树干类、主根和枝干类、细根类、树叶类[5]。我们也将砍伐导致的废料算入凋落物中。将分解物分为两类：快速腐殖质和慢速腐殖质。整个过程如图 3 所示。

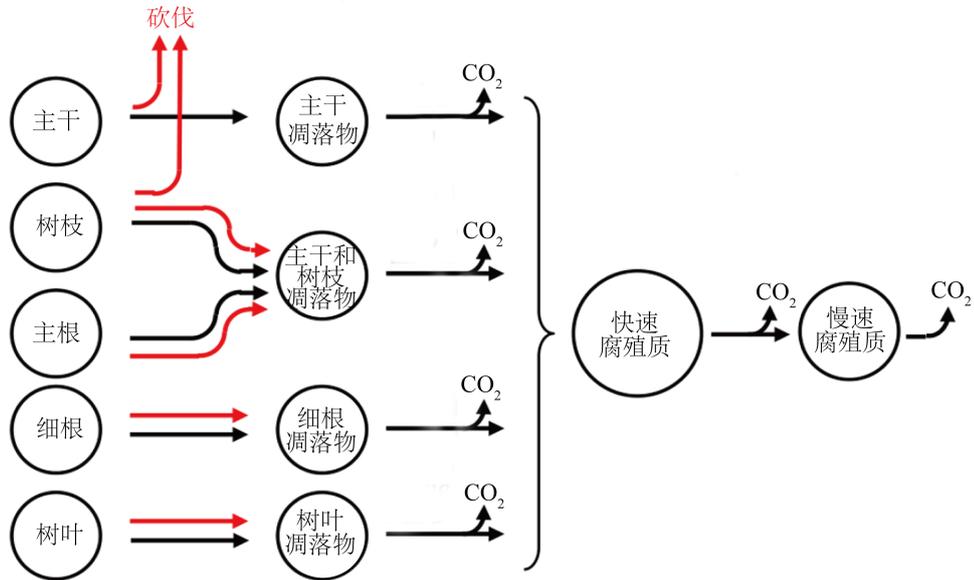


Figure 3. Processes of carbon sequestration in litter
图 3. 凋落物的固碳量变化过程

凋落物转变为快速腐殖质

每类凋落物都有着各自的分解率，见表 2。细根类和树叶类的分解率与气温和湿度有关，可以用如下式衡量[6]：

$$k = 0.35 \times resp \times 0.25 \times [1 + 0.094 \times (T - 4) + 0.0023 \times (M + 50)] \quad (3)$$

其中 T 代表年平均气温， M 代表五月到九月的平均湿度值与 PET 的差。

Table 2. Decay rate of different litter compartments

表 2. 不同凋落物的分解率

	落叶林	针叶林
树干类	0.12	0.028
主根和枝干类	0.22	0.22
细根类、树叶类	0.35	0.25

腐殖质的变化过程

腐殖质分为两个部分：快速腐殖质和慢速腐殖质。凋落物分解后转化为快速腐殖质，快速腐殖质分

解后变为慢速腐殖质。凋落物分解后一部分转化为二氧化碳，一部分转化为快速腐殖质，见表 3。

Table 3. Fraction of litter decay converted into fast humus

表 3. 凋落物分解后转化为快速腐殖质的比例

	落叶林	针叶林
树干类	0.45	0.45
主根和枝干类	0.45	0.45
细根类	0.27	0.27
树叶类	0.51	0.51

快速腐殖质的分解率取决于年平均气温，它通常用下式计算[4]

$$\text{decay rate} = e^{-0.11 \times T} \quad (4)$$

慢速腐殖质的分解率大约为快速腐殖质分解率的 0.007 倍，并且大约有 0.0033 的快速腐殖质转变为慢速腐殖质。

通过模拟上述过程，我们可以得到一段时间内凋落物的固碳量变化情况。

2.3. 砍伐模块

现实中，砍伐的树木一部分用于燃烧，一部分用于制造木制品。在实际中，由于焚烧、加工过程的损耗等，木制品的固碳量更加接近于理论下限，而不是上限，因此，我们设砍伐的树木有四分之一做成了木制品。

我们将砍伐树木抽象为从森林中抽取固碳量，一次砍伐相当于从森林中取走了一定的固碳量。这些取走的碳，一部分作为木制品，一部分作为残留物开始腐烂的过程(残留物比例见表 4)，一部分作为燃料，一次性释放所有碳。

Table 4. Losses of different organs

表 4. 不同部分的砍伐残留物比例

	落叶林	针叶林
树干	0	0
枝干	0.05	0.07
主根	0.1	0.09
细根	0.02	0.015
树叶	0.02	0.07
总计	0.19	0.24

木制品在寿命结束后释放所有碳(通常是降解或燃烧)，然而，木制品的寿命难以衡量。木制品的使用寿命大约为 5~60 年，且集中分布在 10~20 年间。因此，我们假设使用寿命服从正态分布 $X \sim N(10,10)$ ，如图 4 所示。

通过上述过程，我们可以模拟木制品在一段时间内的固碳量变化情况。

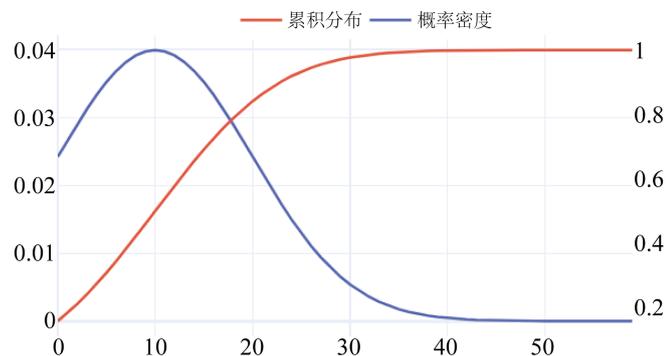


Figure 4. The normal distribution

图 4. 使用寿命分布

2.4. 模型测试与分析

通过将上文三个模块的结果相加，我们就可以得到一段时间内森林固碳量的变化情况。为了更好的评估砍伐的影响，我们将一个地区的所有树木视为一篇森林。

首先，我们不考虑木制品的固碳量变化。在一定时间后，执行砍伐操作。然后，我们观察森林固碳量的变化情况，如图 5 所示。我们可以看到砍伐后，森林固碳量立刻减少，但是随着时间的推移，森林逐渐恢复到与未砍伐时的固碳量一致。这与现实相符合，说明了模型的合理性。

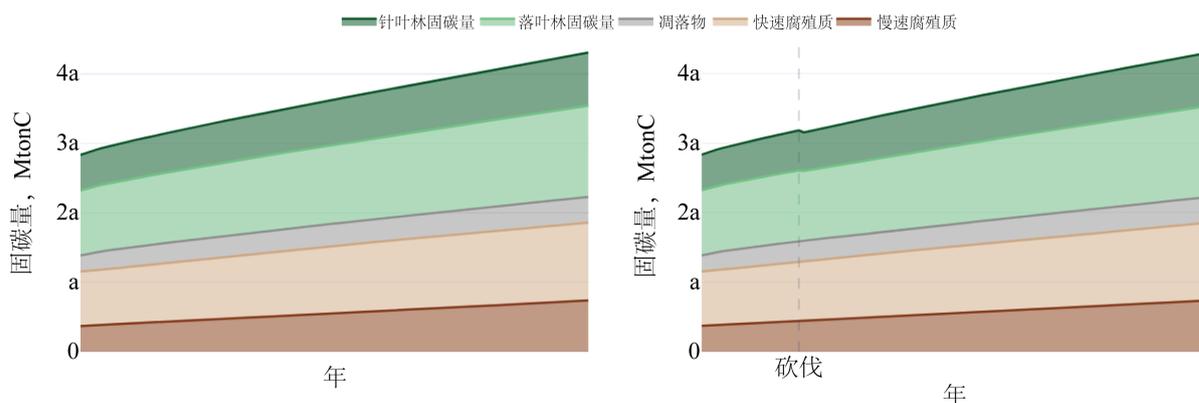


Figure 5. The change in the amount of carbon sequestration with no felling vs felling

图 5. 不砍伐和砍伐时固碳量的变化情况

接着，我们考虑木制品。我们让砍伐后森林固碳量减去不砍伐时森林的固碳量，如果结果大于 0，则说明砍伐后森林固碳量增加了，反之，如果结果小于 0，则说明砍伐后森林固碳量减少。如图 6 所示，我们将结果分为三个阶段：

1) 由于砍伐导致的浪费和燃烧等造成的固碳量减少。

2) 由于森林再生固碳量逐渐增加。最终，由于木制品的固碳量原因，总的固碳量可能会大于自然生长的森林固碳量。

3) 由于木制品使用寿命结束，释放二氧化碳，导致森林固碳量逐渐变少，但随着时间推移，最终趋于与自然生长的森林一致。

这三个阶段与现实相符，也从一方面说明了模型的合理性。

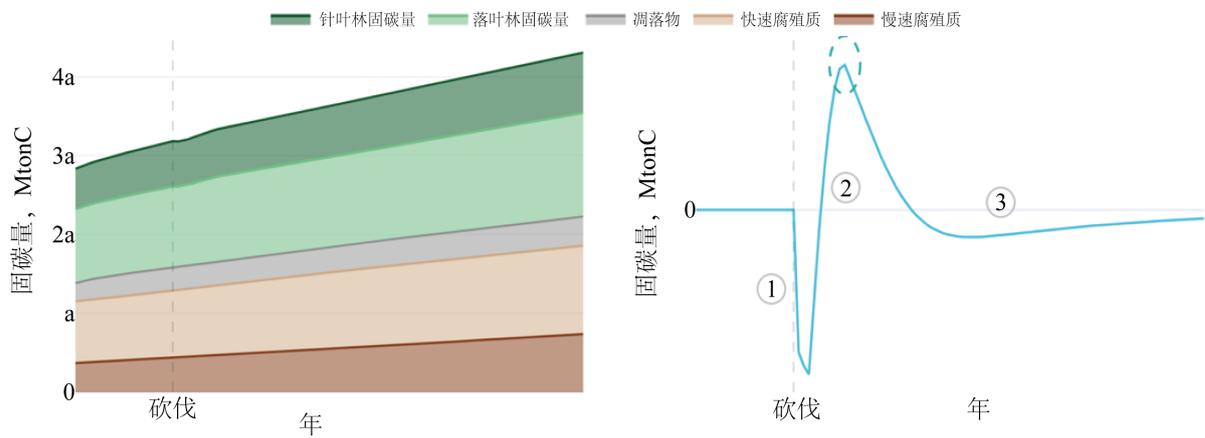


Figure 6. The change in the amount of carbon sequestration with products
图 6. 考虑木制品时固碳量的变化情况

然而，当我们不断增大砍伐量和缩短砍伐周期时，固碳量变化情况如图 7 所示，我们可以看出砍伐量过大和砍伐周期过短时，都会产生负面影响。因此，通过模型的结果，我们可以制定最有益的砍伐策略。

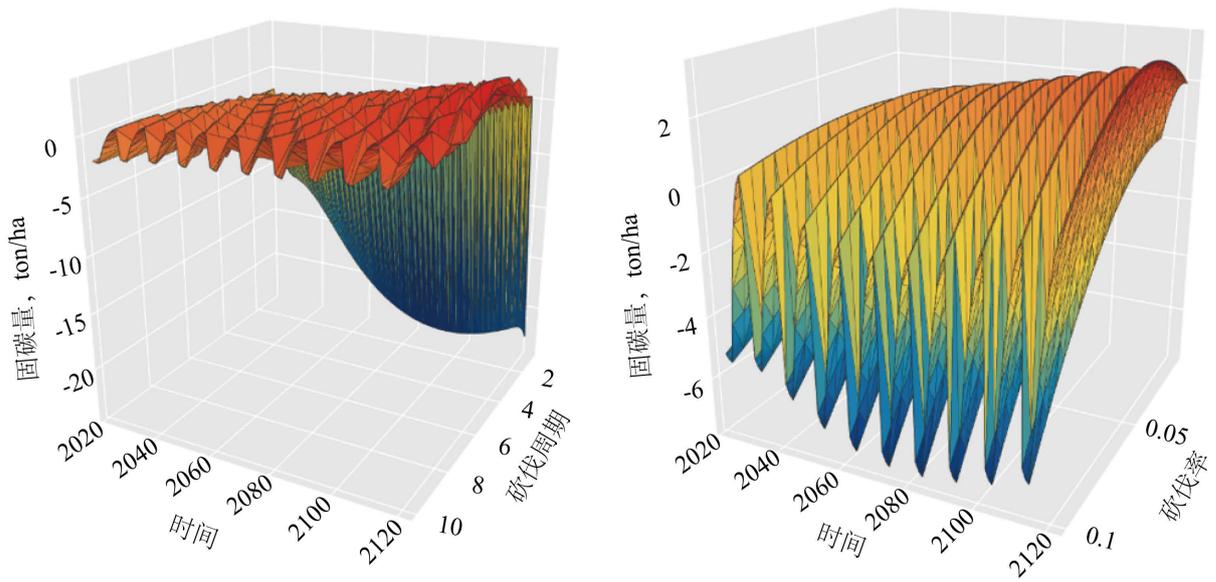


Figure 7. Impact of felling strategies on carbon sequestration
图 7. 不同砍伐策略对固碳量的影响

3. 模型在法国地区的应用

我们收集了法国各个地区的相关数据，为了对未来的固碳量进行模拟，我们对法国历年气温进行了拟合，年平均气温可以通过下式估计：

$$T = 0.6957 \times \ln(\text{year} - 1979) + 8.854$$

通过模拟我们得到了法国各个地区未来 100 年内固碳量的变化，如图 8 所示。

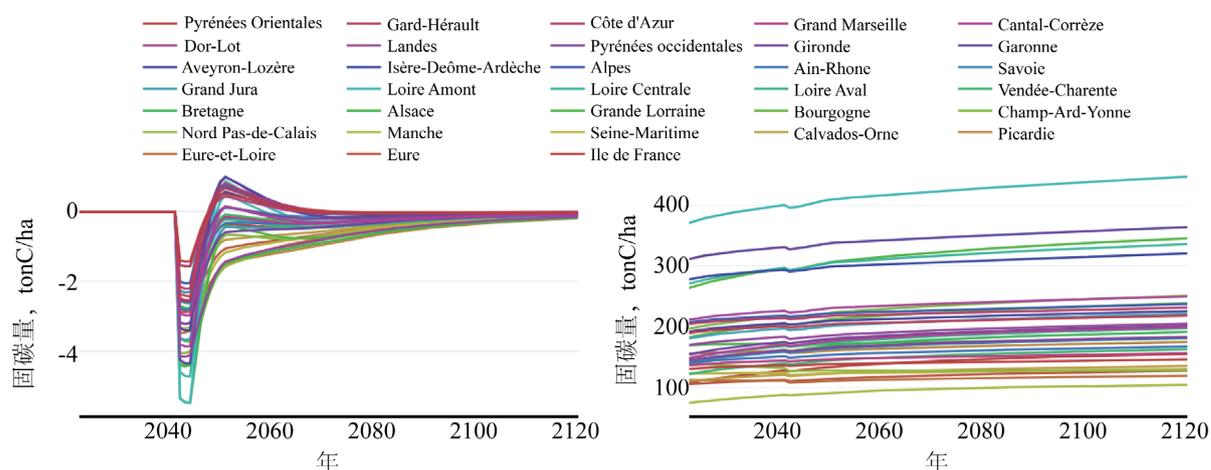


Figure 8. Changes of carbon sequestration in different regions of France

图 8. 法国各个地区固碳量变化情况

从图 8 可以看出，并不是所有地区都适合砍伐，当该地区林地面积较小时，砍伐可能会导致森林固碳量降低，带来负面影响。当森林成长率较大时，砍伐可以带来更大的收益。

我们以 Isère-Drôme-Ardèche 地区为例，搜索得到最优砍伐率为落叶林 1.47%、针叶林 6.21%，砍伐周期为 5 年。

因此，通过模型结果，我们可以制定更加有益的砍伐策略，不仅提高了收益，还能有效提高固碳量，从而减缓温室效应。

4. 总结

本文建立的模型通过模拟森林自然变化情况、凋落物自然分解过程以及砍伐后制成木产品的使用过程来估算一个地区内森林固碳量的变化情况。根据固碳量的变化，可以制定更加合理的砍伐策略，以提高收益，并且减缓温室效应带来的影响，对森林管理和环境保护具有一定的实际意义。

参考文献

- [1] 姜昕, 王秀娟. 森林的最优采伐决策模型——一个新的林业经济政策分析框架[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 178-185.
- [2] Duvigneaud, P. (1969) Concepts sur la productivité primaire des écosystèmes forestiers.
- [3] Díaz, S. (2013) Ecosystem Function Measurement, Terrestrial Communities. In: *Encyclopedia of Biodiversity* (2nd Edition), 72-89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00042-3>
- [4] Le Noë, J., Matej, S., Magerl, A., Bhan, M., Erb, K.H. and Gingrich, S. (2020) Modeling and Empirical Validation of Long-Term Carbon Sequestration in Forests (France, 1850-2015). *Global Change Biology*, **26**, 2421-2434. <https://doi.org/10.1111/gcb.15004>
- [5] Perruchoud, D., Joos, F., Fischlin, A., Hajdas, I. and Bonani, G. (1999) Evaluating Timescales of Carbon Turnover in Temperate Forest Soils with Radiocarbon Data. *Global Biogeochemical Cycles*, **13**, 555-573. <https://doi.org/10.1029/1999GB900003>
- [6] Liski, J., Perruchoud, D. and Karjalainen, T. (2002) Increasing Carbon Stocks in the Forest Soils of Western Europe. *Forest Ecology and Management*, **169**, 159-175. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00306-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00306-7)