

CENTURY 模型在杉木人工林生态系统的适用性研究

郝 博¹, 闫文德^{1,2,3}

(1. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南 会同 418307)

摘 要: 基于土壤有机质模型 CENTURY 研究典型亚热带杉木人工林有着重要意义。本研究以湖南会同杉木林生态站为研究地点, 基于会同观测站的长期气象资料, 以及站内杉木人工林的生物量实测资料和生产力实测资料, 对 CENTURY 模型进行了校正和模拟。首先在现有研究基础上收集模型运行所需数据, 如土壤质地和土壤 C、N 含量等。其次在模型内的文件中改写所需驱动参数。运行模型后的结果表明: CENTURY 模型模拟杉木人工林生物量的模拟值与实测值变化趋势一致, 决定系数 R^2 为 0.937, 大于临界值, 均方根误差值 $RMSE$ 为 $27.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同时在以月为单位的时间尺度上能够准确模拟杉木林生产力的变化, 模拟结果反应气候与降水随着季节变化影响到杉木林生产力的变化, 在适宜的气温和降水量达到峰值时植物生长也进入最活跃阶段, 与先前的生产力研究结果吻合, 说明模型能够模拟杉木林生物量对驱动参数变化的响应, 适用于杉木林生态系统。

关键词: 杉木人工林; CENTURY 模型; 模型验证; 适用性

中图分类号: S791.27

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2017)07-0000-00

Validation and adaptability evaluation of Chinese fir plantation ecosystem model CENTURY

HAO Bo¹, YAN Wende^{1,2,3}

(1. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China Changsha 410004, Hunan, China; 3. Huitong National Field Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong 418307, Hunan, China)

Abstract: It has important significance to use the soil organic carbon CENTURY model simulates the biomass of typical subtropical Chinese fir plantation. In this study, we set up study sites at Chinese fir Plantation in Hunan Province Ecological Station. The CENTURY model calibration and simulation base on a long time observation station meteorological data, as well as the station of Chinese fir plantation biomass productivity measured data. First we collect the research data needed for model running, Such as soil texture and soil C and N content. And then rewrite the model driving parameters. The model operation results show that Chinese fir plantation simulated values have a same trend with the measured values. The determination coefficient (R^2) was 0.937 greater than the critical value. Relative mean square roots was $27.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The model is able to accurately simulate the productivity of Chinese fir plantation with month as the time unit. The simulation results react the relationship between the climate and precipitation with productivity of Chinese fir plantation. Peak under suitable temperature and precipitation during plant growth has entered the most active stage, with consistent with previous research results. All above explain this model can be applied to Chinese fir plantation ecosystem.

Keywords: Chinese fir plantation; CENTURY model; model validation; applicability

杉木作为我国特有的用材树种, 具有优良速生的优点, 已经具有上千年的栽培历史, 其繁殖速度快、生长周期快、材质优良、产量高、易于管理而受到造林人的青睐^[1]。杉木林同时是我们

国家南方集体林区主要栽育的重要森林类型, 其栽培范围主要存在于我国整个亚热带省区, 占全国人工林栽种面积的四分之一, 在我国的生态建设与森林生产以及环境保护中占有重要的地位,

收稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家林业公益性行业科研项目“亚热带人工林固碳潜力及增汇途径研究”(201404316)

作者简介: 郝 博, 硕士研究生

通讯作者: 闫文德, 教授, 博士; E-mail: csfuywd@hotmail.com

引文格式: 郝 博, 闫文德. CENTURY 模型在杉木人工林生态系统的适用性研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(7):

其研究的深度与广度也远超其他树种^[2-5]。近年来随着人工林多带连栽, 呈现出杉木人工林生产力下降等生态问题, 因而, 对杉木人工林生产力和生物量变化的研究, 对于维持杉木林长期生产力和可持续发展, 提供科学依据, 对杉木林的长期经营具有指导意义。

我国杉木林生产力和生物量的研究, 可以追溯到 20 世纪 60 年代初期, 在 20 世纪 70 年代初, 杉木生产力和生物量的研究工作大量开展, 徐凤翔, 冯宗炜等发表了大量相关研究报告^[6]。本文采用 CENTURY 模型模拟人工杉木林生产力和生物量, 验证 CENTURY 模型在会同杉木人工林区域的适用性。在生态模型最初的发展阶段, 来自美国科罗拉多大学的 Parton 等建立了 CENTURY 模型。此模型最早使用只限于对草地生态系统中 C、N、P、S 等元素的长期演变进行监控模拟, 后继学者逐步将模型应用于不同地区的众多试验站点。模型将土壤有机质划分不同的碳库, 是以土壤有机质为基础的动态模型, 随着研究人员和学者的进一步开发, 模型模拟范围扩大到了森林、耕地、稀树草原等生态系统中, 并且达到了许多研究学者的预期成果^[7-10]。

CENTURY 模型在不同生态环境运行时需要输入不同的数据参数, 在输入有效的参数之后, CENTURY 模型才能正常运转。影响土壤有机质分解的 4 个重要变量分别是降雨量、温度、土壤质地和植物木质素, 这 4 个变量被视为试验点的特征值, 以此区别的不同生态环境地理特征。CENTURY 模型下面又包括 3 个子模型, 依次是植物产量模型, 土壤有机质模型和土壤水分温度模型。土壤有机质模型又分为结构库和代谢库。模型是在月时间为步长运行, 主要的输入参数包括土壤数据、气候参数数据、土壤容重等。相对于其他生态模型, CENTURY 模型在适用性方面更加宽广, 可以应用于不同的生态环境之下, 其土壤有机碳子模型之外包含了其他诸多子模型如植物生产子模型等, 所以模型运行机理比较复杂。

1 研究区概况

试验地位于湖南省西南部会同县区域内, 是国家林业局重点森林生态系统定位观测站, 地理位置位于东经 109°45', 北纬 26°50'。依据站点的长期观测数据, 年平均气温为 16.8℃, 气候属于典型的亚热带湿润气候, 平均相对湿度保持在 80% 左右, 年平均降水量在 1 100 ~ 1 400 mm 之间。

试验地处于开阔的低山丘陵山地, 海拔 300 ~ 500 m, 相对高度 150 m 以下, 平均坡度在 20° 以上, 实验地植被以常绿阔叶林为主, 绝大部分为杉木人工林, 分布广阔。实验区土层的风化程度较高, 土层厚度大约在 80 cm 以上, 随着土壤层次的向下降低, 土壤储水量变少, 土壤质地为偏细的山地黄壤土, 介于轻壤与粘壤之间, 表层土壤呈褐色、淡黄色等, 下层土壤呈橙黄色。根据土壤实地测试结果, 林地土层有机质为 3.0% ~ 4.8%, 氮元素为 0.13% ~ 0.20%, 磷元素为 0.04% ~ 0.06%。研究区内划分为 7 个平均面积为 2 hm² 的集水区, 其 1 个为对照区。

2 研究方法

2.1 模型简介

本实验使用 CENTURY V4.6 版本模型运行试验。先获取模型所需数据, 再对模型进行参数初始化, 利用获取数据运行模型, 运行一定年份后达到均衡状态。最后进行模型的检验分析与评价。

CENTURY 模型运行结构如图 1 所示, 首先由 FILE100 帮助更新数值或创造新的参数选项, 再由 EVENT100 建立模拟时间尺度及模拟过程中发生的事件。可依据用户需求更改相应文件驱动变量, 如 CROP.100 为农作物参数文件, FERT.100 为施肥参数文件, FIRE.100 为火烧参数文件等等。每个 .100 后缀文件都有相应的 .def 后缀文件用来说明各个参数。其中天气驱动变量在 .WTH 的后缀文件中输入, 而在 site.100 中输入站点特定参数, 如土壤质地和降雨量等。在 FILE.100 中完成参数修改和输入后, 将由 EVENT100 进行调用, 按照进程进行模拟, 最终得出模拟结果。

2.2 数据来源及参数初始化

CENTURY 模型所需的气象资料包括月最高、最低气温和降水量等。这些资料均来自与会同站气象观测站, CENTURY 模型要求最少 10 年的气象资料来确定正态函数分布。部分气象数据说明如表 1 所示。

土壤数据中, 土壤的田间持水率、土壤容重及 pH 值等指标来自于会同站点的实测值。土壤质地及土壤有机质和 C/N 来源于野外试验和相关文献。植被数据来源于野外调查、室内试验及相关文献 [11-18]。生物量以及生产力的实测数据参考康文星、杨超^[18-23]等研究成果。

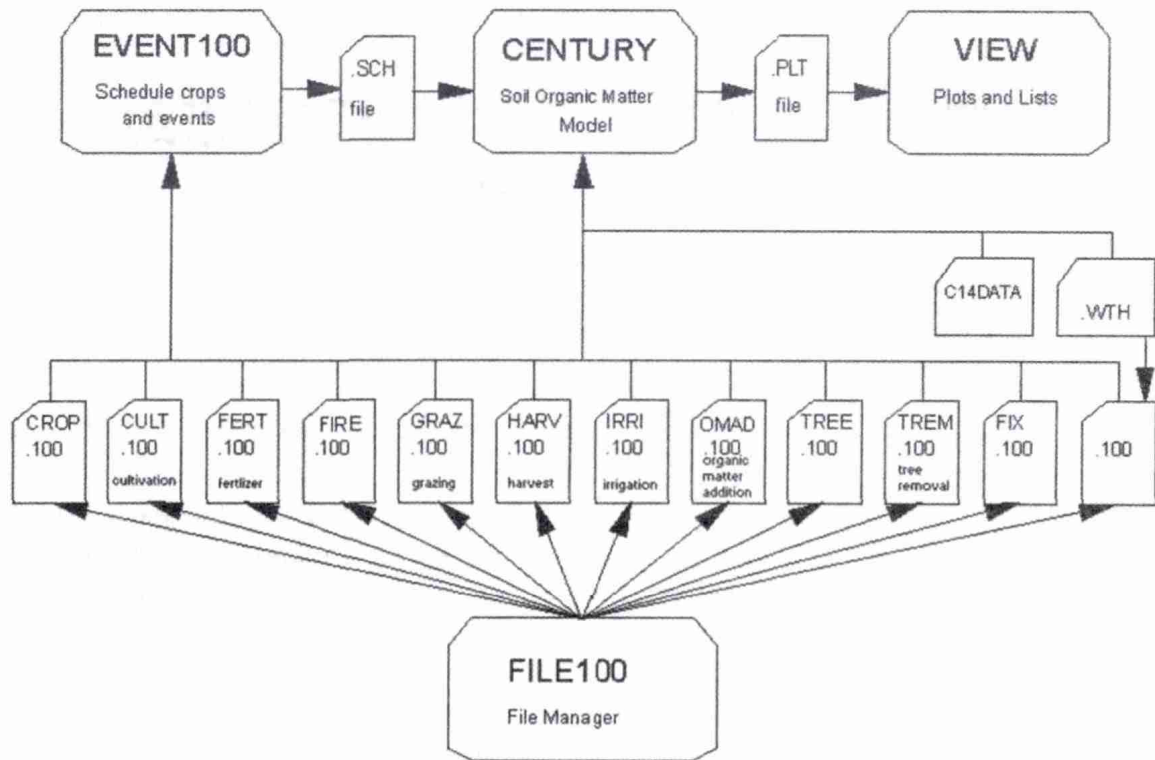


图 1 CENTURY 模型运行文件结构
Fig.1 File structure and the Century model running

表 1 部分气候变量及站点初始化参数说明
Table 1 Parameters related to initial status of systems and climate driving variables

参数名称	初始化数值	说明
*** Site and control parameters***		
IVAUTO	0	初始化土壤碳库, 0= 用户提供始值
NELEM	1	所需模拟元素数量 (含 C)
SITLAT	26.40	站点纬度
SITLNG	109.26	站点经度
SAND	0.446 5	砂石比例
SILT	0.305 8	粉土比例
CLAY	0.247 7	黏土比例
BULKD	1.245 4	容重
NLAYER	3	水模型中土层数量
PH	5	表层土壤 pH 值
Climate Parameters		
RWCF(1)	0.342 6	1—3 层的土壤含水量, 每层 20 cm
RWCF(2)	0.263 2	
RWCF(3)	0.262 4	
PRECIP(1—12)	62.780	1—12 月单月平均降水量 cm
PRCSTD(1—12)	28.142	1—12 月单月降水量的标准偏差
PRCSKW(1—12)	1.292 1	1—12 月单月降水量的标偏态值
TMX2M(1—12)	8.754 5	月最高气温
TMN2M(1—12)	3.663 6	月最低气温

2.3 模型验证与分析

本采取的对模型结果评价与检测的方法与国内外通用的检测方法相同。首先通过模拟值与实

际值的图表进行直接观测, 对模型的模拟准确性有大概的判断。其次, 对模拟结果进行线性回归分析来科学合理的量化评价模型。主要是计算得出模拟值与观测值线性回归系数 (a), 截距 (b), 决定系数 (R^2) 和相对均方根误差 (RMSE), 计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - X_i)^2}{n}}$$

式中: Y_i 和 X_i 分别为模拟值和实测值, n 为观测样本数量。模型调试的原则是尽可能获的较高的相关系数, 且使截距 b 趋近于 1。模型的敏感性分析确定主要参数不变, 然后选取想要分析的参数, 上下微调改变参数数值, 然后分析在观察参数变化后, 模型结果的改变, 以此确定参数的重要性。

2.4 统计分析

用 Microsoft Excel2010 软件完成数据处理和制图, 采用 SPSS18.0 软件进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 模型验证

在 CENTURY 模型中, 以杉木林作为初始阶段, 运行 500 a 后模型达到稳定状态, 主要输出变量是生产力和生物量。基于 1996—2009 年会同

杉木人工林生态站生物量实测值与模拟值比较表明, 实测值与模拟均非常接近, 只有少数年份如 2003 年差值较大。从图 2 可以直观看出模拟结果较为合理, 且变化趋势一致, 模拟值在 1996 年为 $19.66 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 实测值为 $31.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 模拟值在初期小于实测值, 在模拟中期 2000 年至 2007 年间模拟值大于实测值。模拟值与实测值最大差距出现在 2003 年, 实测值为 $97.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 模拟值为 $116.65 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在模拟后期 2009 年时, 实测值再次高于模拟值, 分别为 $199.94 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $188.43 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 所有节点差值均在 30% 以内, 因此认为模型适用性较好。

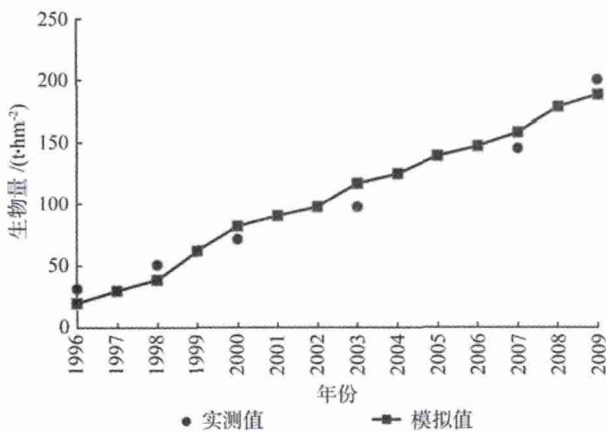


图 2 杉木人工林生态系统生物量实测值与模拟值的比较
Fig.2 Comparison of observed and simulated biomass of Chinese fir plantation

基于模型的模拟结果与 CENTURY 模型模拟值进行回归分析, 得到生物量观测值 (x) 与模拟值 (y) 得线性回归方程位为: $y=0.74x+56.67(R^2=0.937, N=19, P < 0.01)$ 如图 3 所示。样地 R^2 值大于 $\alpha=0.05$ 时的临界值, 说明模拟值与实测值显著相关, 结果显示模拟值与实测值的误差平方根 ($RMSE$) 为 $27.46 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。通过对比图 2 可以很好的看出, CENTURY 模型能够胜任模拟会同站杉木人工林的模拟趋势, 对于月步长的 CENTURY 模型来说, 模型输出结果是平均值, 而实测值为某一天实际生物量, 因此存在数值上的偏差, 其次模型的时间单位为月时, 会改变某段时间内极端天气事件对生物生长的影响, 结果就是使模拟过程干扰了模型模拟精度, 无法做到模拟结果与实测数据完全相同, 但总体上模拟结果是可以接受的。

3.2 模型敏感性分析

为了分析模型对驱动变量改变的响应, 将模

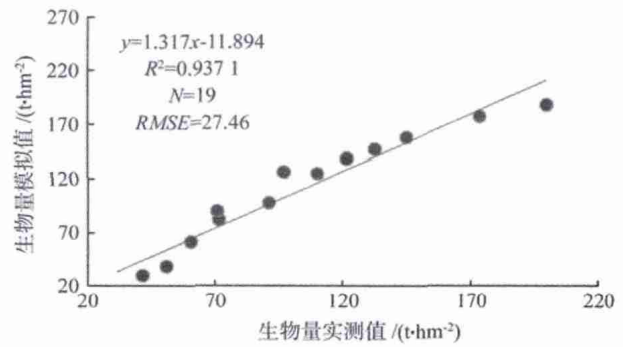


图 3 会同杉木人工林生物量模拟值与实测值线性回归
Fig.3 Correlation analysis of simulated and observed biomass of Chinese fir plantation

型参数文件中的气候驱动变量每月最低气温平均值、最高气温平均值增加或减少 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 同时每月降水量提高或降低 20%, 然后分别记下不同改变后生物量模拟的结果, 结果如表 2 所示。

表 2 CENTURY 模型对气候驱动参数的敏感度分析
Table 2 Sensitivity analysis of CENTURY model to climate driving variables

驱动变量	幅度	生物量变化率 / %
月平均最低温度 / $^\circ\text{C}$	1	-1.03
TMN2M(1 ~ 12) / $^\circ\text{C}$	-1	0.14
月平均最高温度 / $^\circ\text{C}$	1	2.46
TMX2M(1 ~ 12) / $^\circ\text{C}$	-1	-0.02
月降水量	5%	13.63
PRECIP(1 ~ 12)	-5%	-13.63

杉木人工林的生物生长对于降水改变后的响应幅度很大, 当降水量增加 5% 时, 杉木人工林生物量增加 13%, 降水量减少 5% 时, 人工林生物量减少 13%; 当最高温度升高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 人工林生物量减少 11.99%, 当最高温度减少 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 人工林生物量增加 0.02%; 当月平均最低气温增加 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 人工林生物量减少 1.02%, 当月平均最低气温减少 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 人工林生物量变化幅度则会非常小。

3.3 生产力季节动态模拟

对于生态站内三种林龄的杉木林以月为步长分别作生产力的季节动态模拟, 分别是 7 a 生杉木林、14 a 生杉木林和 20 a 生杉木林。模拟结果如图 4 所示, 三种林龄的杉木林显示出相近的季节动态趋势, 生产力高峰均出现在 4 月到 6 月, 三种林龄植物全年均有生长, 约占全年生产力的 56.22%, 降水量开始进入高峰期, 气候温度也逐渐回暖, 杉木营养物质输入增加, 这个时间段杉木林开始准备快速生长。其中 7a 生杉木林在 5 月达到模拟生产力顶峰为 $1.05 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 14 a 年杉木

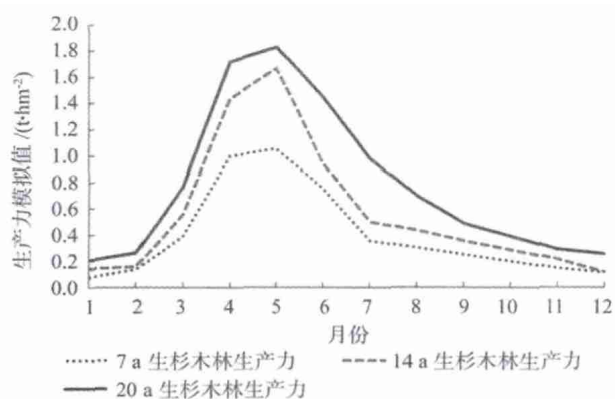


图 4 杉木林 3 种林龄的月生产力动态

Fig.4 Monthly productivity of the three year-old Chinese fir plantation

林则为 $1.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 20 a 生杉木林最高为 $1.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 进入 8 月份降水量开始减少, 养分也同时减少, 气候温度仍保持在高温季节, 水分蒸散量变大, 综上条件使得生产力逐步下降, 其中 7 a 生杉木林在 8 月模拟生产力为 $0.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 14 a 年杉木林则为 $0.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 20 a 生杉木林最高为 $0.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 但在每年 11 月到第二年 2 月期间生产力大大下降, 显示气温对生产力影响很大, 同时降雨量也相对骤减, 两种因素同时导致生产力降低, 其中 7 a 生杉木生产力在 1 月份达到最低点为 $0.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 14 a 生杉木林模拟生产力在 12 月份最低降至 $0.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 20 a 生的植被最低生产力远高于 7 a 和 14 a, 在 1 月份达到了 $0.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。同时 7 a 生杉木、14 a 生杉木和 20 a 生杉木生产力季节变化趋势相同, 但同期生产力 $20 \text{ a} > 14 \text{ a} > 7 \text{ a}$, 表明模拟结果能够正确的显示出杉木林从幼林到成熟林时的生产力变化。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) CENTURY 模型在模拟典型亚热带人工林杉木林的生物量时, 模拟结果符合预期, 杉木林生物量与实测值的图表变化趋势接近, 模型具有较好的模拟能力, 同时校正结果显示, 线性回归系数与 1 接近, 相关系数能够达到 0.05, 表现为显著相关水平。虽然无法与实测数据做到完全吻合, 如果能完善模型的驱动变量, 提高模型输入数据的准确性, CENTURY 模型会更精确的完成在会同人工杉木林的模拟工作。

(2) 模型对驱动变量响应程度的敏感性分析可以发现, 杉木人工林生物量对月平均降水量和月最高温度的变化反应最明显, 而对月平均最低

温度的变化缺乏响应, 大量研究表明水分不仅在植被植物光合作用中占据主导地位, 同时是植物在发生生理化学反应时的重要元素。在降水量很低的情况下, 太阳辐射和温度上升反而会对植物造成负面影响。而气候驱动变量的敏感性分析也为模型在模拟未来森林生态系统生物量提供了重要的参考价值, 在模型的后续使用中确立准确的完成气候驱动变量假设才能准确的模拟未来生物量的变化走势。

(3) 对 3 种林龄的生产力季节动态模拟说明即使在小范围时间尺度内, 模型也能够准确模拟生产力变化趋势, 而月份则是模型的最小时间步长。每年 3 月份开始, 降水量开始进入高峰期, 气候温度也逐渐回暖, 杉木营养物质输入增加, 这个时间段杉木林开始准备快速生长, 直到 6 月都是每年杉木林生产力最高的一段时间, 进入 8 月之后降水量开始减少, 养分也同时减少, 气候温度仍保持在高温季节, 水分蒸散量变大, 综上条件使得杉木林生产力远低于 3 月份至 6 月份高峰期。收到林木生长规律以及降水量进一步减少的影响, 11 月开始杉木林生产力维持在较低水平线上。而在同时间段, 生产力方面 20 a 生杉木林大于 14 a 生杉木林大于 7 a 生杉木林, 说明模拟结果符合幼林到成熟林生产力稳步上升的过程。

4.2 问题与展望

我国引入 CENTURY 模型研究土壤有机碳可以追溯到 20 世纪 90 年代中期。因为在最初 CENTURY 模型为模拟草原生态系统而研发, 所以我国学者首先也是把 CENTURY 模型应用在草原生态系统中。肖向明等利用 CENTURY 模型模拟了蒙古锡林河草原的净初级生产力和有机质, 研究结果显示与野外实验的实地测试结果趋势一致。高崇升通过 CENTURY 模型来预测黑土农田土壤有机碳的演变, 在不同的农业经营模式下, 大部分情况下土壤有机碳呈下降趋势, 但在某些农业模式中下降趋势却不明显, 为农业发展提供了重要指导方向。同时还有许多的相似研究表明, CENTURY 模型在我国不同地区不同生态系统中都有较好的模型结果。

本研究依靠大量的数据支撑 CENTURY 模型的运行, 有部分参数难以直接获取需要大量文献的参阅, 同时在数据的时间长度上存在空白期造成某时期内缺乏连续性, 对部分缺乏的数据进行合理的推算, 得到合理范围内的计算值, 保证

数据完整, 虽然对最后的模拟结果造成了未知的影响。

随着遥感技术和地理信息系统技术的发展, 前者能够提供实时的地表信息状态, 后者可以进行空间分析, 将生态模型与遥感、GIS 技术进行合并将是以后的研究趋势。在已经进行的国内外众多 CENTURY 模型研究中, 多数集中在大尺度范围内, 中小尺度的区域范围内研究较少。大尺度范围所运用的数据不会非常精确, 因而覆盖了许多小尺度区域的数据, 造成具体小范围内的研究结果存在偏差。考虑区域性数据的唯一性, 应当加强模型在中小区域范围内的应用。

参考文献:

- [1] 刘世荣, 温远光. 杉木生产力生态学 [M]. 北京: 气象出版社, 2005:1-3.
- [2] 田大伦, 项文化, 闫文德. 速生阶段杉木人工林产量结构及生产力的代际效应 [J]. 林业科学, 2002,38(4):14-18.
- [3] 田大伦, 盘宏华, 康文星, 等. 第二代杉木人工林生物量的研究 [J]. 中南林学院学报, 1998,18(3):11-16.
- [4] 王丹, 王兵, 戴伟, 等. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素 [J]. 林业科学研究, 2009,22(5):667-671.
- [5] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤 C 储量的影响 [J]. 中南林学院学报, 2004, 24(1):1-5.
- [6] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡 [J]. 中南林学院学报, 2002,22(1): 1-6.
- [7] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林凋落物量及其分解过程中碳的释放量 [J]. 中南林学院学报, 2005, 25(1): 12-15.
- [8] 焦秀梅, 项文化, 田大伦. 湖南省森林植被的碳贮量及其地理分布规律 [J]. 中南林学院学报, 2005,25(1)4-8.
- [9] 湛小勇, 田大伦, 彭元英, 等. 我国杉木人工林生物产量研究概况 [C]// 林生态系统定位研究. 北京: 中国林业出版社, 1993:10-17.
- [10] 闫文德, 田大伦, 何功秀. 湖南会同第二代杉木人工林乔木层生物量的分布格局 [J]. 林业资源管理, 2003,7(2):5-7.
- [11] 闫文德, 田大伦, 焦秀梅. 会同第二代杉木人工林林下植被生物量分布及动态. [J]. 林业科学研究, 2003, 16(3):323-328
- [12] 田大伦. 杉木林生态系统功能过程 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [13] 田大伦, 康文星, 文仕知. 杉木林生态系统学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [14] Parton W J, Rasmussen P E. Long-term effect of crop management in wheat-fallow: CENTURY model simulations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(2):530-536
- [15] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 等. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化. 自然状态下土壤有机碳的积累 [J]. 应用生态学报, 2004,15(5): 772-776.
- [16] 许文强, 陈曦, 罗格平, 等. 基于 CENTURY 模型研究干旱区人工绿洲开发与管理模式变化对土壤碳动态的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3707-3716.
- [17] 高崇升, 杨国亭, 王建国, 等. 利用 CENTURY 模型模拟不同农业经营模式下黑土农田土壤有机碳的演变 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 911-915.
- [18] 高崇升, 杨国亭, 王建国, 等. CENTURY 模型在农田生态系统中的应用及其参数确定 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(1):50-52.
- [19] Tagir G, Gilmanov, William J Parton and Dennis S. Ojima. Testing the CENTURY Ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR Representing wide climate gradient [J]. Ecological Modeling, 1997, 96:191-210.
- [20] 申卫军, 彭少麟, 鄂建国, 等. 南亚热带鹤山主要人工林生态系统 C、N 累积及分配格局的模拟研究 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(5):690-99.
- [21] 李东, 明珠. 基于 CENTURY 模型的高寒草甸土壤有机碳动态研究: 开垦对土壤有机碳的影响 [J]. 草业学报, 2011(1): 12-16.
- [22] Parton W J. Adapting a biomass simulation model to a tropical grassland [J]. Ecological Modeling, 1984, 23(1-2):151-163.
- [23] 李斌, 方晰, 田大伦, 等. 湖南省现有森林植被主要树种的碳含量 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015,35(1):46-49.

[本文编校: 吴毅]