

采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的长期影响

王伟峰¹, 魏晓华², 段玉玺¹, 王 博¹, 张立欣¹, 李晓晶¹

(1. 内蒙古林业科学研究所, 呼和浩特 010010; 2. 加拿大不列颠哥伦比亚大学, 加拿大不列颠哥伦比亚省 基洛纳 V1V1V7)

摘 要:在全球气候变化背景下,人工林的适应性管理对固碳潜力的提升具有重要影响。应用加拿大不列颠哥伦比亚大学开发的 FORECAST 森林生态系统管理模型,通过外业调查、查找相关文献资源等方式收集不同立地条件下杉木林分的生物量积累、林分密度、光响应曲线及土壤养分方面的数据。模型经过校准和检验后,模拟不同采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的影响。结果表明:SO 处理(采伐茎干,采伐剩余物留在林地)对杉木林长期固碳效果最好;FR 处理其次(采伐茎干,清除地上部分采伐剩余物),而 WH(全树采伐,清除所有采伐剩余物)和 SB(采伐后,火烧采伐剩余物)固碳效果最差。该研究可为杉木人工林的可持续经营提供理论依据。

关键词:采伐剩余物; FORECAST 模型; 固碳量; 杉木人工林

中图分类号:S718.55⁺6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0198-06

Long-term Effects of Logging Residue Treatment on Carbon Sequestration in Chinese Fir Plantation

WANG Weifeng¹, WEI Xiaohua², DUAN Yuxi¹, WANG Bo¹, ZHANG Lixin¹, LI Xiaojing¹

(1. Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot 010010, China;

2. University of British Columbia, Okanagan Campus, Kelowna, British Columbia V1V1V7, Canada)

Abstract: Under the background of global climate change, adaptive management of plantation has the important influence on the promotion of carbon sequestration potential. Using FORECAST ecosystem management model developed by University of British Columbia, Canada, through field investigation, collecting Chinese fir relevant literature resources under different site conditions. The data include biomass accumulation, stand density, light response curve and soil nutrient, we calibrate and test model, and simulate different logging residue treatment effects of Chinese fir plantation on carbon sequestration. The results showed that SO treatment (cutting stem, logging residue in forest land) of Chinese fir carbon sequestration long-term effect is the best, followed by FR treatment second part (cutting stem, cleaning the ground logging residue), but WH (cutting full tree, remove all logging residue) and SB (after cutting, burning logging residue) carbon sequestration effects are the worst. This study can provide theoretical basis for sustainable management of Chinese fir plantation.

Keywords: logging residue; FORECAST model; carbon sequestration; Chinese fir plantation

在全球气候变化背景下,人工林的适应性管理成为学术界关注的热点研究领域^[1]。目前,我国的人工林面积占全球人工林面积的 73%,人工林保存面积居全球第一,占地 6 200 万 hm^2 ^[2]。然而,大面积的人工林也存在森林质量差、生产力低、树种单一等问题。以我国亚热带区域为例,大面积营造的杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 纯林和多代连栽,出现了地力衰退、生物多样性减少、病虫害加剧、水土保持功能下降等一系列生态问题,通过科

学的经营管理从一定程度上可以缓解这种状况^[3]。实现森林的可持续经营是个系统性的工程,开展技术创新(生长模拟、经营模型构建及信息化管理等)是提高杉木人工林可持续经营的重要途径^[4]。采伐剩余物的处理方式从一定程度上反映了集约经营和粗放经营的理念,同时也对人工林林地养分的维持产生不同的影响。目前,采伐剩余物的处理方式对杉木人工林生长的影响也有所报道,但多数研究仅限于短期内的评估^[5-7]。采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳

量的长期影响如何?过去的研究由于受到人力、物力和技术的限制,缺乏长期观测数据的积累,对解决此类问题缺乏系统的认识,研究结果存在一定的局限性。本研究应用加拿大不列颠哥伦比亚大学开发的FORECAST模型评估不同采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的长期影响,有利于深入了解杉木人工林生态系统的固碳可持续性,为其可持续经营提供科学依据。

1 研究区概况

杉木分布遍及中国整个亚热带,栽培区域达16个省区。东自浙江、福建及台湾山区,西至云南、四川盆地西缘及安宁河流域,南自广东中部和广西中南部,北至秦岭南麓、桐柏山、大别山,102°—122°E,22°—34°N都有分布。杉木垂直分布的幅度随纬度和地形而变化,中心产区主要分布于海拔800~1 000 m以下丘陵山地;南部和西部山区的分布较高,在峨眉山达海拔1 800 m,云南东部会泽达海拔2 900 m;东部及北部的分布较低,一般在海拔600~800 m以下,个别地区则可达1 000 m左右。分布区内的年平均温度为15~20℃,年降水量800~2 000 mm。杉木较喜光,但幼时稍能耐侧方蔽荫。对土壤的要求较高,最适宜肥沃、深厚、疏松、排水良好的土壤,而在土壤瘠薄、板结及排水不良的立地生长较差,产区主要土类为黄壤和红壤,以黄壤条件较好。本研究用于FORECAST模型验证的野外观测样地主要分布在杉木中心产区之一的江西省,包括上饶市德兴、九江市武宁、宜春市铜鼓、抚州市乐安、吉安市永丰、赣州市崇义等,植被主要有杉木、杨桐(*Adinandra millettii*)、木荷(*Schima superba*)、榿木(*Loropetalum chinense*)、南烛(*Vaccinium bracteatum*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、木姜子(*Litsea pungens*)、野漆(*Toxicodendron succedaneum*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等。

2 研究方法

通常认为,森林固碳过程的监测和模拟是两个相对独立的事情,事实上,精确验证的现代模拟技术可以对不同尺度复杂动态系统的碳固定潜力进行模拟,是监测工作中一项十分有用的工具^[8-9]。因此,本研究采用的是基于样地调查和模型模拟相结合的方法。首先,以24块杉木人工林野外实测样地为基础(分幼、中、近、成、过熟林,每块样地的水平投影面积为800 m²),通过采集植物和土壤样品(植物分干、枝、叶、根分别采集,共96个样品;土壤按0—10,10—20,20—30,30—50,50—100 cm分层采集,每一层重

复取样3次,把同一层次土壤样品按质量比例混合,共120个样品)。采用元素分析仪测定植物有机碳百分含量,K₂Cr₂O₇外加热容量法测定土壤有机质含量,全N和全P采用HClO₄—H₂SO₄消化法,消化或提取后的溶液分别使用全自动化学分析仪Smart-Chem进行化学分析。然后,利用野外实测样地数据结合文献发表的相关数据对FORECAST模型进行校准,在模型验证的基础上,通过设置不同采伐剩余物情景模拟杉木人工林的长期固碳效果。

2.1 FORECAST模型简介

目前,FORECAST模型已在世界上主要森林类型中得到广泛应用,被认为是模拟森林经营管理能力最强的模型之一,加拿大、美国、西班牙、中国等应用该模型进行了相关研究^[3]。FORECAST模型是基于混合模型原理而开发的,该模型充分结合了过程模型和机理模型的优势,建立在整个森林生态系统的物质生产和养分循环规律之上。研究表明,一个森林生态系统的生产力大小取决于该系统的叶量和光合效率。对某一树种,光合效率的高低取决于光照条件和叶氮含量两个因素。叶氮含量由生态系统养分循环状况决定,是一个能反映系统的物质生产、养分循环及环境状况的综合性指标。因此,FORECAST模型的驱动机制就是叶氮效率(foliage nitrogen efficiency, FNE),它从输入的基础数据中计算获得^[10]。该模型的参数可以分为必需参数和非必需参数,和植物生长、土壤养分等相关的参数为必需参数,其他参数(如坡面渗漏、矿物质风化、生物固氮等)可采用系统的默认值或相近区域的数据,非必需参数的缺省不会对模型结果产生重要影响。在模型中,系统可以创建三种立地条件(好、中、差)并用立地指数(site index, SI)表示^[11-12]。以杉木人工林为例,通过不同立地条件下的树高生长数据,用模型可拟合相应的生长过程,SI=17,21,27分别代表差、中、好三种立地条件下的优势木平均高(基准年龄为50 a),通过不同的立地条件和林分生长特征相耦合,模拟采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的影响。

2.2 模拟情景设置

在不同立地条件下(SI=17,27),采伐剩余物的形式分别为SO(Stem only,只采伐茎干,其余采伐剩余物全部留在地面)、FR(Floor Removed,清除所有地上采伐剩余物,包括树枝、叶以及地被物)、WH(Whole Tree Harvest,全树采伐,清理地上和地下采伐剩余物)、SB(Stem only and Burning,树木采伐后,只取走干材,其余地上采伐剩余物火烧处理),造林密度为2 500株/hm²、轮伐期为25 a,模拟时间跨

度为 150 a(6 个轮伐期)。

2.3 相关参数定义

为了研究不同采伐剩余物处理措施对杉木人工林固碳量的影响,特定义以下参数作为结果分析的依据:地上生物量碳(ABCS):指乔木层的树干、树皮、树枝、树叶等固碳量(未包括灌木和草本);地下生物量碳(UBCS):指地下根系(粗根、中根和细根)的固碳量;总生物量碳(TBCS):指地上生物量碳与地下生物量碳之和, $TBCS = ABCS + UBCS$;土壤有机碳(SOC):指地上凋落物和土壤有机质(通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合称)中的固碳量;总固碳量(TCS):总生物量碳与土壤有机碳之和, $TCS = TBCS + SOC$ 。

3 FORECAST 模型的校准和验证

3.1 FORECAST 模型的校准

FORECAST 模型参数在 Bi 等^[13]构建的数据库基础上进行了部分调整,调整的依据是通过野外调查对非必需参数的缺省值进行了完善,使模型系统参数值更能反映出亚热带区域杉木人工林的林分结构特征和土壤养分循环过程。模型校准参考了《杉木林生态系统学》^[14]、《中国生态系统定位观测与研究数据集:湖

南会同杉木林站(1982—2009)》^[15]和《杉木人工林长期生产力保持机制研究》^[16],校准数据主要包括树木生物量、各组分营养浓度(树干、树皮、树枝、树叶、树根)、林分密度、光响应曲线、树高、林冠结构、土壤养分输入、凋落物分解速率等^[10]。应用 FORECAST 模型模拟杉木人工林时需要校准的主要参数见表 1。

3.2 FORECAST 模型的验证

FORECAST 模型的验证参考了 Blanco 等提出的方法^[17],用来验证的数据来自样地调查和参考文献^[18],这些数据是基于不同立地条件下的杉木人工林年龄序列数据,主要包括树高、胸径、地上生物量和地被物量。为了评价模型的表现性,需要对观测值与预测值进行比较,主要指标为平均偏差、平均绝对偏差、预测值与观测值进行线性回归拟合后得到的皮尔森相关系数(r)。此外,还计算了两个不同的指标,第一个指标是泰尔不等式系数(U):

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=q}^n D_i^2}{\sum_{i=1}^n \text{Observed}_i^2}}$$

(1)

式中: D_i 为第 i 个观测值与预测值的差值; n 是数据的个数; $U \in [0, \infty)$,如果 $U=0$ 则表示模型的预测效果非常好, U 值越大模型的预测效果越差;

表 1 模拟杉木人工林时需要校准的 FORECAST 模型参数

主要参数	单位	好立地(SI=27)	差立地(SI=17)
氮浓度:新叶/老叶/死叶	%	1.53/1.36/1.13	1.21/1.11/0.93
氮浓度:茎边材/茎心材	%	0.14/0.03	0.12/0.03
氮浓度:活树皮/死树皮	%	0.44/0.27	0.37/0.24
氮浓度:活树枝/死树枝	%	0.67/0.52	0.55/0.47
氮浓度:根边材/根心材	%	0.37/0.06	0.35/0.06
氮浓度:活细根/死细根	%	1.17/0.97	0.96/0.79
遮阴的叶最大生物量	全光照的%	8	30
占据土壤体积最大的细根生物量	%	100	95
根获取氮的效率	%	98	100
保留时间:新叶/老叶/枯死枝	a	1/2/40	1/2/40
细根周转	a	0.95	1.35
边材分解率	%/a	1~5 a(2.0);6~10 a(10.0);11~15 a(30.0);16~20 a(20.0);>20 a(4.0)	参数同好立地
心材分解率	%/a	1~10 a(0.4);11~15 a(10.0);16~25 a(15.0);25~40 a(10.0);>40 a(2.0)	参数同好立地
树皮分解率	%/a	1~5 a(2.0);6~20 a(12.0);20~40 a(20.0);>40 a(4.0)	参数同好立地
树枝和粗根分解率	%/a	1~5 a(10.0);6~10 a(45.0);11~15 a(35.0);>15 a(4.0)	参数同好立地
针叶分解率	%/a	1~2 a(27.0);3~5 a(30.0);6~10 a(40.0);>10 a(3.0)	1~2 a(20.0);3~5 a(30.0);6~10 a(40.0);>10 a(2.0)
细根分解率	%/a	1~2 a(30.0);3~4 a(50.0);>4 a(9.0)	参数同好立地

注:分解率是表示在 1 a 里初始质量损失的百分比。

第二个指标是模型效率(ME):

$$ME=1-\frac{\sum D_i^2}{\sum (\text{Observed}_i-\text{predicted})^2} \quad (2)$$

如果 ME=1 表示模型的性能很好,ME=0 表明模型并不比一个简单的平均表现好,如果 ME 为负值表明模型的性能较差。

最后,计算了两个不同置信水平上的临界误差,具体计算结果见表 2。

表 2 FORECAST 模型预测杉木人工林相关指标与野外实测数据的比较

模型表现 相关指标	优势 木高/m	优势木 胸径/cm	地上生物量/ (t·hm ⁻²)	地被物量/ (t·hm ⁻²)
平均偏差	0.66	-0.47	-5.89	0.01
平均绝对偏差	1.01	0.98m	11.38	0.59
皮尔森系数	0.97	0.96	0.95	0.82
泰尔系数	0.07	0.07	0.13	0.21
模型效率	0.96	0.92	0.95	0.85
e* (α=0.05)	1.63	1.69	21.91	1.03
e* (α=0.20)	1.23	1.27	15.94	0.78

注:e*:雷诺兹临界误差。

4 结果与分析

4.1 采伐剩余物处理方式对总固碳量和年均固碳量的影响

在差的立地条件下(图 1),150 a 间 4 种采伐剩余物处理方式对总固碳量的影响依次是:SO(353.44 t/hm²)

表 3 不同采伐剩余物处理方式下的年均固碳量和每个轮伐期固碳量(SI=17)

处理方式	年均固碳量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)					每个轮伐期固碳量/(t·hm ⁻²)				
	ABCS	UBCS	TBCS	SOC	TCS	ABCS	UBCS	TBCS	SOC	TCS
SO 茎干	1.26	0.31	1.57	0.78	2.36	31.57	7.77	39.34	19.56	58.91
FR 地上	1.05	0.26	1.31	0.72	2.03	26.20	6.43	32.63	18.05	50.67
WH 全树	0.98	0.24	1.22	0.70	1.91	24.39	5.99	30.38	17.38	47.76
SB 火烧	1.01	0.24	1.25	0.71	1.96	25.27	6.04	31.31	17.77	49.08

在好的立地条件下(图 2),150 a 间 4 种采伐剩余物处理方式对总固碳量的影响与差立地趋势相同,SO(859.69 t/hm²)>FR(735.96 t/hm²)>SB(713.54 t/hm²)>WH(679.56 t/hm²)。茎干采伐方式(SO)总生物固碳量最大,为 620.30 t/hm²,全树采伐方式(WH)总生物固碳量最小,为 460.66 t/hm²;茎干采伐方式总生物固碳量是全树采伐方式的 135%;4 种采伐方式下土壤有机碳的变化范围为 218.89~239.39 t/hm²。

无论是年均固碳量,还是每个轮伐期内的固碳量,在好的立地条件下都是 SO>FR>SB>WH,4 种采伐剩余物处理方式下的年均总固碳量依次为:5.73,4.91,4.76,4.53 t/hm²;每个轮伐期内的总固碳量依次为:143.28,122.66,118.92,113.26 t/hm²

>FR(304.05 t/hm²)>SB(294.49 t/hm²)>WH(286.55 t/hm²)。茎干采伐方式(SO)总生物固碳量最大,为 236.06 t/hm²,全树采伐方式(WH)总生物固碳量最小,为 182.27 t/hm²;茎干采伐方式总生物固碳量是全树采伐方式的 129%;4 种采伐方式下土壤有机碳的变化范围为 104.28~117.38 t/hm²。

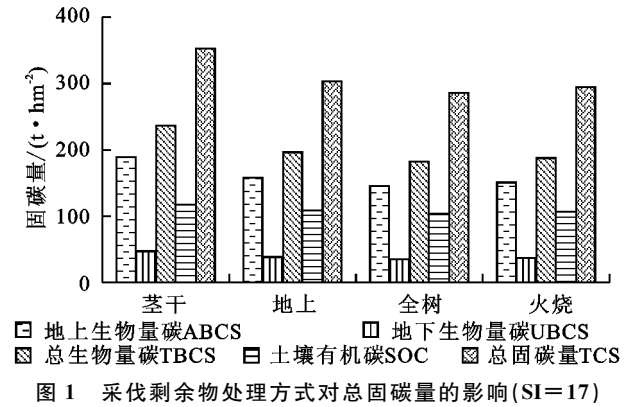


图 1 采伐剩余物处理方式对总固碳量的影响(SI=17)

无论是年均固碳量,还是每个轮伐期内的固碳量,在差的立地条件下都是 SO>FR>SB>WH,4 种采伐剩余物处理方式下的年均总固碳量依次为:2.36,2.03,1.96,1.91 t/hm²;每个轮伐期内的总固碳量依次为:58.91,50.67,49.08,47.76 t/hm²(表 3)。在同一轮伐期内,与 SO 这种方式相比,采用 FR 的方式,总生物固碳量减少了 17.06%;采用 SB 的方式,总生物固碳量减少了 20.41%;采用 WH 这种方式,总生物固碳量减少了 22.78%。

(表 4)。在同一轮伐期内,与 SO 这种方式相比,采用 FR 的方式,总生物固碳量减少了 17.73%,土壤有机碳减少了 5.74%;采用 SB 的方式,总生物固碳量减少了 20.75%,土壤有机碳减少了 7.29%;采用 WH 这种方式,总生物固碳量减少了 25.73%,土壤有机碳减少了 8.57%。

4.2 采伐剩余物处理方式对土壤有效氮的影响

在差的立地条件下,各种采伐剩余物处理方式对土壤有效氮的影响不明显,与茎干采伐方式相比,其他各处理的土壤有效氮在每个轮伐期内有小幅下降(图 3)。在好的立地条件下,茎干采伐方式明显优于其他各处理方式,火烧和全树采伐这两种方式对土壤有效氮的影响较大,明显降低了土壤有效氮的含量(图 4)。采伐剩余物的处理方式将会通过改变凋

落物分解向土壤中输入的碳氮而影响土壤氮的转化。水平。然而,当这些干扰减轻后,有效氮的损失也随之减少。

森林砍伐和采伐剩余物燃烧,提高了氮素的矿化

表 4 不同采伐剩余物处理方式下的年均固碳量和每个轮伐期固碳量(SI=27)

处理方式	年均固碳量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)					每个轮伐期固碳量/(t·hm ⁻²)				
	ABCS	UBCS	TBCS	SOC	TCS	ABCS	UBCS	TBCS	SOC	TCS
SO 茎干	3.33	0.80	4.14	1.60	5.73	83.35	20.03	103.38	39.90	143.28
FR 地上	2.74	0.67	3.40	1.50	4.91	68.38	16.66	85.05	37.61	122.66
WH 全树	2.47	0.60	3.07	1.46	4.53	61.70	15.07	76.78	36.48	113.26
SB 火烧	2.65	0.63	3.28	1.48	4.76	66.28	15.65	81.93	36.99	118.92

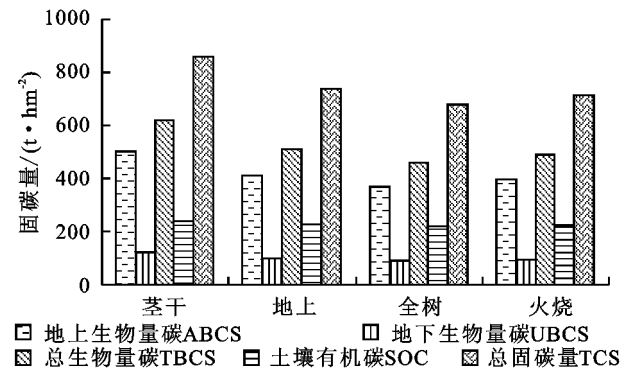


图 2 采伐剩余物处理方式对总固碳量的影响(SI=27)

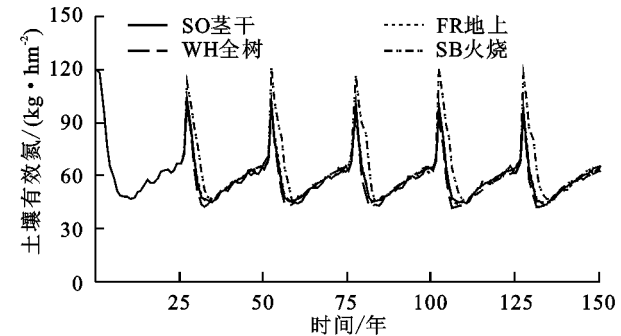


图 3 采伐剩余物处理方式对土壤有效氮的影响(SI=17)

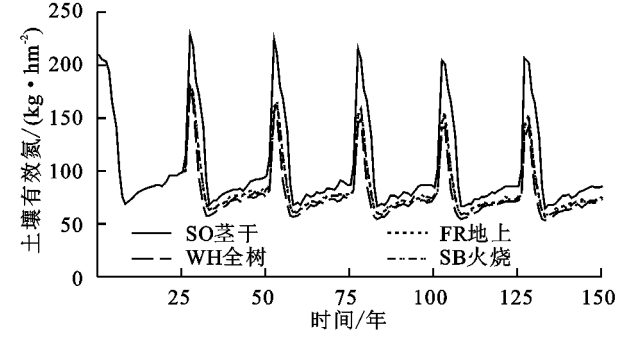


图 4 采伐剩余物处理方式对土壤有效氮的影响(SI=27)

5 讨论与结论

已有研究表明^[19-21],影响杉木地上、地下和平均生物量的主导因子为收获方式,影响力最小的因子分别为采伐剩余物处理方式、整地方式和采伐剩余物处理方式,最优水平组合为仅收获茎干,块状整地挖穴回填表土,采伐剩余物和灌草平铺林地,本研究得到的结论与其基本一致。曹永康等^[22]研究了不同采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的短期影响,试

验后 1~10 a,加倍添加采伐剩余物处理的总固碳量高于茎干采伐处理,这主要是与在采伐迹地上添加采伐剩余物,经分解和淋溶作用而导致土壤含碳量增加。这表明采伐剩余物是影响林地土壤养分的重要因素,其数量和分布改变了原有的地表径流和土壤养分循环,直接影响了土壤有机碳的组成。因此,在采伐迹地上清理采伐剩余物和地被物,是造成总固碳量偏低的重要原因。胡振宏等^[23]研究了 15 a 生 2 代杉木人工林 5 种采伐剩余物管理措施(收获采伐剩余物和地被层、全树收获、仅收获树干和树皮以及加倍采伐剩余物、炼山)对土壤碳氮含量的影响,结果表明采伐剩余物管理措施对亚热带杉木人工林土壤全碳、全氮含量的效应并不显著,本研究结论与其存在矛盾,这可能是由立地条件和林分密度等引起的,而且该研究是短期内的评估,缺乏进一步的跟踪监测。王荣伟^[24]也研究了炼山 20 a 后,未炼山的人工林各项生长指标均优于炼山的林分,炼山的林地出现土壤物理性质变差的趋势,且表层受炼山的影响更大,本研究也进一步支持了上述观点,这是由于炼山清理等人为干扰活动对林地土壤表层的影响更为直接,导致土壤容重升高、pH 值下降、土壤有机质、全氮、全磷、全钾等均有不同程度的降低,还使林地水土流失加重。从长远来看,炼山对杉木林的地力维持十分不利。在比较阔叶林和针叶林采伐剩余物处理方式的研究中发现^[25],栲树林火烧后表层土壤有机碳和全氮的损失量和损失率均明显大于杉木林,这与两林分火烧前土壤有机碳和全氮贮量及火烧强度差异有关。而且火烧后栲树林土壤碳、氮恢复速率低于杉木林,可见我国南方林区把大面积常绿阔叶林砍伐后采用火烧方法清理采伐迹地将对土壤碳、氮储量造成不利的影响。因此,从生态系统固碳的角度考虑,应该营造杉阔混交林来提升固碳量^[26]。与所有的模型一样,FORECAST 模型在应用中也存在一定的局限性。例如,该模型中许多土壤过程的表示相对简单,土壤范围、土壤混合和根分配表示的缺乏限制了模型解决土壤压实和侵蚀问题的能力。此外,该模型也没有考虑水分对植被生长的影响,只是将水分作为养分吸收的一个限制因子,这些问题有待对模型进一步的完善^[8]。

本研究表明,SO 处理(采伐茎干,采伐剩余物留在林地)对杉木林长期固碳效果最好,FR 处理其次(采伐茎干,清除地上部分采伐剩余物),而 WH(全树采伐,清除所有采伐剩余物)和 SB(采伐后,火烧采伐剩余物)固碳效果最差。造成采伐剩余物处理方式对土壤有效氮影响的主要原因是:通过不同的采伐剩余物处理方式改变了土壤的干湿循环,采伐剩余物、凋落物和林下层对土壤具有一定的保护作用。清除了这些物质,增加了土壤温度和湿度的变幅并对微生物产生不利的影响,降低了林地有效氮的水平。此外,清除采伐剩余物会减少生态系统对有效氮的固定,植物吸收土壤中的有效氮然后固定在其体内,从而影响土壤有效氮水平,植物生长量越大这种影响就越明显。大量的采伐剩余物有利于林地的水土保持和土壤养分循环,火烧会造成水土流失和养分损失,不利于杉木后期生长和林地长期生产力的维持。为了实现杉木人工林的固碳可持续性,建议在生产实践中尽量保留采伐剩余物。本研究只是讨论了采伐剩余物处理方式一种情景,在生产实践中,杉木人工林的经营管理存在多情景交互作用(如杉阔混交、林农间作、氮沉降作用等),这些科学问题有待今后深入研究。

致谢:本研究在 FORECAST 模型校准与验证方面得到了西班牙纳瓦拉国立大学 Blanco J A 博士的帮助,在野外调查工作方面得到了江西农业大学刘苑秋教授、欧阳勵志教授及其研究生的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 王伟峰,段玉玺,张立欣,等. 适应全球气候变化的森林固碳计量方法评述[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(3):170-176.
- [2] 魏晓华,郑吉,刘国华,等. 人工林碳汇潜力新概念及应用[J]. 生态学报,2015,35(12):3881-3885.
- [3] Wang W F, Wei X H, Liao W M, et al. Evaluation of the effects of forest management strategies on carbon sequestration in evergreen broad-leaved (*Phoebe bournei*) plantation forests using FORECAST ecosystem model[J]. Forest Ecology and Management, 2013,300,21-32.
- [4] 吴承祯,洪伟,著. 杉木数量经营学引论[M]. 北京:中国林业出版社,2000.
- [5] 盛炜彤,范少辉. 杉木及其人工林自身特性对长期立地生产力的影响[J]. 林业科学研究,2002,15(6):629-636.
- [6] 姜丹,何宗明,尹云锋,等. 采伐剩余物管理方式对人工林土壤黑碳和黑氮的影响[J]. 亚热带资源与环境学报,2014,9(3):68-74.
- [7] 李新乐. 采伐剩余物处理对杉木生长的影响[J]. 林业勘察设计,2011(2):35-38.
- [8] Kimmins J P, Blanco J A, Seely B, et al. Complexity in modelling forest ecosystems: How much is enough? [J]. Forest Ecology and Management, 2008,256(10):1646-1658.
- [9] Seely B, Welham C, Kimmins J P. Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, FORECAST[J]. Forest Ecology and Management, 2002,169(1-2):123-135.
- [10] Kimmins J P, Mailly D, Seely B. Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST[J]. Ecological Modelling, 1999,122(3):195-224.
- [11] 接程月,辛赞红,王晓颖,等. FORECAST 模型的原理、方法及应用[J]. 浙江林学院学报,2009,26(6):909-915.
- [12] 田晓,胡靖宇,刘苑秋,等. 森林生态系统经营的新模式:FORECAST 模型[J]. 林业调查规划,2010,35(6):18-22.
- [13] Bi J, Blanco J A, Kimmins J P, et al. Yield decline in Chinese fir plantations: a simulation investigation with implications for model complexity[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007,37(9):1615-1630.
- [14] 田大伦,康文星,文仕知,等. 杉木林生态系统学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [15] 田大伦. 中国生态系统定位观测与研究数据集:湖南会同杉木林站(1982—2009)[M]. 北京:中国农业出版社,2011.
- [16] 盛炜彤,范少辉. 杉木人工林长期生产力保持机制研究[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [17] Blanco J A, Seely B, Welham C, et al. Testing the performance of a forest ecosystem model(FORECAST) against 29 years of field data in a *Pseudotsuga menziesii* plantation[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007,37(10):1808-1820.
- [18] Wei X H, Blanco J A. Significant Increase in Ecosystem C Can Be Achieved with Sustainable Forest Management in Subtropical Plantation Forests [J]. Plos One, 2014,9(2):e89688. doi:10.1371/journal.pone.0089688.
- [19] 俞元春. 杉木林土壤肥力变化和长期生产力维持研究[D]. 南京:南京林业大学,1999.
- [20] 仲应喜. 采伐剩余物管理方式对二代杉木幼林生产力的影响[D]. 福州:福建农林大学,2005.
- [21] 杨靖宇. 采伐剩余物处理方式对 15 年生杉木林碳、氮影响的研究[D]. 福州:福建农林大学,2012.
- [22] 曹永康. 不同采伐剩余物处理方式对二代杉木人工林生态系统碳储量的影响[D]. 福州:福建农林大学,2008.
- [23] 胡振宏,何宗明,范少辉,等. 采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. 生态学报,2013,33(13):4205-4213.
- [24] 王荣伟. 不同营林措施对杉木人工林生长及土壤肥力的影响[D]. 福州:福建农林大学,2012.
- [25] 郭剑芬. 皆伐火烧对杉木林和栲树林碳、氮动态的影响[D]. 福建厦门:厦门大学,2006.
- [26] 王伟峰. 杉木及其混交林碳储特征与森林经营长期影响的模拟研究[D]. 南昌:江西农业大学,2014.