

DOI: 10.20103/j.stxb.202404030719

邓诗宇, 张明芳, 侯怡萍, 余恩旭, 李强, 刘子佩, 胡嘉毅, 田洲, 徐亚莉. 气候变化下川西地区森林碳储量对森林管理措施和干扰的长期响应. 生态学报, 2025, 45(1): 210-226.

Deng S Y, Zhang M F, Hou Y P, Yu E X, Li Q, Liu Z P, Hu J Y, Tian Z, Xu Y L. Long-term responses of forest aboveground carbon storage to forest management measures and disturbances under climate change in the western Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 210-226.

气候变化下川西地区森林碳储量对森林管理措施和干扰的长期响应

邓诗宇¹, 张明芳^{1,*}, 侯怡萍², 余恩旭³, 李强⁴, 刘子佩¹, 胡嘉毅¹, 田洲¹, 徐亚莉¹

¹ 电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731

² 不列颠哥伦比亚大学(奥肯那根校区), 加拿大 不列颠哥伦比亚省 V1V1V7

³ 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091

⁴ 西北农林科技大学, 杨陵 712100

摘要: 评估气候变化下森林管理措施对森林碳储量的长期影响对我国碳中和目标达成具有重要意义。传统森林碳储量评价方法对气候变化、火灾等干扰以及森林经营管理措施等多重影响下森林生态系统长期演替过程刻画不足, 难以有效揭示多种作用因素对区域森林碳汇能力的长期综合影响。针对上述问题, 以气候变化敏感区川西高山、亚高山地区为例, 在探讨传统碳储量评价方法局限性的基础上, 构建了考虑森林干扰的自然恢复和森林干扰-森林经营管理措施组合的人工恢复方案, 结合森林景观生态模型 LANDIS PRO 和森林生态系统碳-水动态模型 PnET-II 模拟, 预测了未来气候情景下(2020—2070年)自然恢复和不同人工恢复方案下区域森林地上碳储量及碳密度的时空动态, 并通过对比筛选出提升固碳能力的最佳森林管理措施。结果表明, 川西地区森林林龄趋于年轻化(平均林龄 40a), 具有巨大碳汇提升潜力。2020—2070年, 自然恢复情景下研究区森林地上碳储量将由 2020 年的 466.99Tg 增加至 2070 年的 780.96Tg, 提高了 67.23%。其中, 以云杉、冷杉为主的成熟、过熟常绿针叶林是川西地区碳储量的主要贡献来源。但是自然恢复情景下川西地区森林平均碳密度在 21 世纪中后期停滞增长, 甚至下降。而人工恢复情景下, 碳密度变化趋势则有所不同。在多种森林干扰与经营管理措施组合方案中, 当森林火灾干扰比例为 0.01/10a 和森林管理措施面积比例为 0.02/10a 时, 川西地区森林地上碳储量提升最大且碳密度呈持续增加趋势。该情景下, 2070 年森林碳储量及碳密度分别将达到 807.76Tg 和 33.33Mg/hm², 较 2020 年分别增加了 72.97% 和 12.21%。2070 年人工恢复情景下森林碳储量和碳密度较于自然恢复情景下分别高 3.4% 和 8.5%。由此可见, 通过人工恢复措施优化将有助于突破川西地区森林固碳能力的自然恢复瓶颈, 提升区域森林生态系统对未来气候的适应能力, 促进未来气候下区域森林碳储量的持续增长。

关键词: 气候变化; 森林地上碳储量; 森林恢复; 森林管理措施; 森林干扰; LANDIS PRO 模型

Long-term responses of forest aboveground carbon storage to forest management measures and disturbances under climate change in the western Sichuan Province

DENG Shiyu¹, ZHANG Mingfang^{1,*}, HOU Yiping², YU Enxu³, LI Qiang⁴, LIU Zipei¹, HU Jiayi¹, TIAN Zhou¹, XU Yali¹

¹ School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

² Department of Earth, Environmental and Geographic Sciences, University of British Columbia (Okanagan), 1177 Research Road, Kelowna, British Columbia V1V1V7, Canada

³ Research Institute of Forest Ecology, Environment and National Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

⁴ College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

基金项目: 四川省科技厅杰出青年科技人才项目(2022JDJQ0005)

收稿日期: 2024-04-03; 网络出版日期: 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mingfangzhang@uestc.edu.cn

Abstract: Assessing the long-term responses of forest aboveground carbon storage (ACS) to forest management measures under climate change is vital for achieving the carbon neutrality goal in China. The traditional methods (e.g., biomass, remote sensing, and carbon flux methods) lack the expression of the long-term succession process of forest ecosystems under the impact of climate change, forest fire, and forest management measures. They fail to disclose the joint effects of forest disturbance and management on long-term forest carbon storage in the western Sichuan Province under climate change. In order to address the limitations of biomass methods, in this study, we used the west of Sichuan Province as an example, a climate change-sensitive region, to predict forest ACS and carbon density dynamics under natural and artificial restoration scenarios (a combination of forest disturbance and forest management measures) from 2020 to 2070 by the forest landscape model (LANDIS PRO) and Photosynthesis and EvapoTranspiration-II (PnET-II) model. The optimal forest management measure to improve forest ACS was identified by comparing future forest carbon storage in western Sichuan Province under various forest restoration measures. Under the natural recovery scenario, the forest ACS will significantly increase from 466.99Tg in 2020 to 780.96Tg in 2070. That is a 67.23% increase in forest carbon storage. The mature and overmature evergreen coniferous forests (e.g., spruce and fir) are the main contributors to forest ACS in the western Sichuan Province. However, forest carbon density will remain stable and even decrease after the middle 21st century under the natural restoration scenario. Contrarily, the decline in forest carbon density is reversed under artificial restoration scenarios. Among the multiple combined scenarios of forest disturbances and forest management measures, the forest ACS and carbon density are highest and consistently increase when the ratio of forest disturbance area is 1%/10a and the ratio of forest management area is 2%/10a. The forest ACS and carbon density will be 807.76 Tg and 33.33 Mg/hm² in 2070, 72.97% and 12.21% higher than 2020, respectively. The forest ACS and carbon density under this artificial restoration scenario are 3.4% and 8.5% higher than that of the natural restoration scenario in 2070, respectively. Our results provide effective scientific support for adaptive forest management under climate change to reach the carbon neutrality goal. Therefore, proper artificial restoration measures can break the bottleneck of natural recovery in forest carbon storage capacity and sustain the increase in forest carbon storage under future climate in the western Sichuan Province.

Key Words: climate change; forest aboveground carbon storage; forest restoration; forest management measures; forest disturbance; LANDIS PRO model

森林是陆地生态系统重要的碳库^[1]。造林或森林恢复成为抵消碳排放及促进碳中和的有效途径之一。自 2000 年以来我国森林面积平均每年增加 300 万 hm²^[2], 目前处于碳汇阶段^[3]。合理的森林经营管理(如林分抚育、林分改造、伐区管理等)能够优化树木生长环境, 促进林分更新, 提升森林碳储量。然而, 过度干扰将影响森林植被生长, 降低树木固碳能力, 使得森林生态系统由碳汇逐渐转为碳源^[4], 加剧全球增温潜势。气候变化(如温室效应、季节性干旱)及其引发的森林火灾和病虫害以及人类活动^[5-7]正不断改变森林植被结构、生态过程和功能^[8]。碳中和背景下森林资源适应性经营管理面临全新的挑战, 尤其在气候变化响应敏感的高山、亚高山地区。因此, 探究气候变化和干扰下森林碳储量对森林经营管理措施的长期响应有利于综合评估森林生态系统固碳潜力以及优化气候变化适应性森林经营管理措施。

当前国内外关于森林碳储量估算方法的研究通常采用传统地面监测手段(如生物量法、碳通量法)结合森林资源清查数据集中在小流域尺度^[3, 9-11](表 1)。这类方法虽然简单高效, 但受限于较高经济成本和人力投入, 通常仅选取具有代表性的森林类型开展调研, 对大尺度森林碳储量的连续时空变异机制刻画不足。遥感法结合生物量法可以实现大尺度流域森林碳储量估算, 但受制于下垫面因素(如地形、气候等), 山区观测精度不稳定, 且连续观测成本较高^[12]。因此难以实现对长期森林植被特征的精细化刻画(例如, 树种和林龄)^[9, 13]。概念性模型具有数据需求少, 计算效率高的特点, 可用于森林生态系统水碳生态功能的作用关系研究, 但模型考虑的生态功能指标有限, 难以解析生态、气候和水文过程相互作用^[14]。例如, InVEST

(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型能简单、高效地评估生态系统服务功能和价值,但其碳储量模块采用固定的植被碳密度,忽略了植被年际固碳动态变化,并且在刻画森林演替过程等方面存在局限性^[15]。ForClim、FORMIND、LINKAGES等景观过程模型等能够较好的刻画气候-植被-生态过程,但通常缺少森林动态演替模块和经营管理模块,也无法直接用于评价森林经营管理措施对森林碳汇功能的长期影响^[16]。而森林经营管理常以景观尺度进行规划,以林分或样地尺度为操作单元,常涉及到树种选择、抚育、补植和计划火烧等管理措施。因此,需要引入能够集成森林动态演替、森林干扰和森林经营管理模块的森林生态空间模型,例如 LANDIS PRO,从而有效满足适应性森林经营管理的切实需求^[17]。

表 1 国内外常用森林碳储量估算方法研究现状及对比

Table 1 Advantages and disadvantages of methods for assessing forest carbon storage

方法 Methods	类别 Classes	类型 Types	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
地面监测法 Ground-based monitoring	生物量法	换算因子法、生物量连续函数法、生物量清单法和蓄积量扩展法等	简单、高效、可行性较高	通常选择发育良好的林分作为调查样地,对植被在某一生长阶段的生物量进行评估,难以刻画反映植被的演替过程
	生态系统碳通量法	涡度相关法、箱式法等	精度、灵敏度较高	经济成本和人力投入较高,多选取代表性森林类型开展定点监测,区域尺度大范围推广可行性不强
卫星监测法 Satellite monitoring	遥感估算法	微波遥感	观测范围较大、时效性强	植被稀疏或郁闭度较高时可能会存在饱和现象,山区精度不稳定,难以从机制上刻画森林演替过程
模型模拟法 Modeling	概念生态模型	InVEST、ARIES、EcoAIM、EPM等	能够定量森林、草地、湿地等各类型生态系统的多种生态服务功能,数据需求少,计算效率高	考虑的生态功能指标有限,缺乏森林植被类型分类刻画,并且对生态、气候和水文过程以及相互作用表达不足
	景观过程模型	ForClim、FORMIND、LINKAGES、iLAND、LANDIS PRO等	能够模拟森林生态过程,可以定量不同时空尺度上森林固碳功能	要求输入高时空分辨率数据,模型参数较多,基础数据获取难度大,数据处理以及模型率定费时

InVEST:生态系统服务评估与权衡模型 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs; ARIES:生态系统服务人工智能模型 Artificial Intelligence for Ecosystem Services; EcoAIM: Exponent 公司开发的生态系统服务功能评估模型 Ecosystem services functional assessment model developed by Exponent incorporated; EPM:生态系统价值综合评估模型 Ecosystem Portfolio Model; ForClim:一种林窗模型,可用于评估气候变化对森林树种组成和生物量的影响 A forest gap model developed to assess the impacts of climatic changes on tree species composition and biomass of forests; FORMIND:一种适用于热带雨林生长模拟的模型 A model was designed particularly for tropical forests; LINKAGES:基于个体的森林生态系统生物地球化学模型 An individual-based forest ecosystem biogeochemistry model; iLAND:基于个体的森林景观和干扰模型 Individual-based forest landscape and disturbance model; LANDIS PRO:一种基于过程的森林景观空间模型 A process-based spatially explicit forest landscape model

川西地区地处长江上游,地跨国家“双重”规划“三区四带”的青藏高原生态屏障区和长江重点生态功能区。该地区森林资源丰富,是四川省乃至整个长江流域碳中和目标达成的重要支撑^[18-19]。在经历早期大规模砍伐后,区域森林资源几近匮乏,森林景观严重破碎化。1998年天然林保护工程启动后,森林植被逐步得到恢复^[20]。然而,由于气候高寒,生境复杂且生态系统脆弱,川西地区植被恢复仍面临严峻挑战。森林资源以低质量的天然次生林和树种单一、稳定性差的人工林为主^[18]。在暖干化气候大背景下,区域森林干扰(如林火、病虫害)频率和强度增大^[21],加之高山、亚高山森林植被生长对气候变化响应尤其敏感,将增加森林生态系统碳汇能力恢复的不确定性^[22]。因此,亟待开展川西高山、亚高山林区气候变化下森林恢复和经营管理措施对森林碳储量的长期综合影响研究,以促进川西地区森林碳储量恢复提升。

针对上述问题,本研究以川西地区为研究对象,融合多源遥感、森林资源清查和野外样地调查等数据,结合基于森林演替过程的森林景观空间模型 LANDIS PRO 和森林生态系统碳-水动态模型 PnET-II,预测自然恢复和不同人工恢复情景下未来川西地区森林地上碳储量(ACS, Aboveground carbon storage)的长期时空动态,

量化气候变化下川西地区森林碳储量对森林干扰和森林管理措施的长期响应,筛选出川西地区应对未来气候变化的适宜性森林恢复措施。为未来气候变化下大尺度流域森林碳储量预测、评估和提升提供决策支撑。本研究将有助于揭示川西地区森林碳汇对气候变化、森林干扰和森林管理措施多重驱动因素的长期响应与适应机制,为高山、亚高山地区气候变化和碳中和背景下的适应性森林经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

川西地区(97°21'36"—105°44'32"E, 28°0'9"—34°20'14"N)总面积约为 29.44 万 km²,包含雅砻江流域、大渡河流域和岷江流域(图 1)。该地区是天然林保护工程实施的主体区和川滇生态屏障,系长江上游重要的水源涵养区和碳汇区^[23]。川西地处青藏高原到四川盆地过渡区,地形地貌复杂多变。海拔范围 258—6874m,平均海拔为 3412.35m;坡度介于 0°—54.11°之间,平均坡度为 12.41°。该地区属于亚热带季风和高原山地气候,雨热同期,但年降水及气温空间分布不均。川西地区多年平均降水量为 750mm,年平均温度为 3.2℃,最高气温可达 18.1℃,最低气温低至-19.0℃。土壤分布呈现较强的垂直地带性且类型丰富,包括山地暗棕壤、淋溶土、高山草甸土等。川西地区森林覆盖率为 36.7%。区域主要森林类型包括常绿针叶林、人工针叶林、天然次生针阔混交林和次生阔叶林等,并且植被垂直分布规律明显。低海拔地区以阔叶林为主,亚高山地区以针阔混交林、寒温带针叶林为主,高海拔地区以高山草甸为主(图 2)。主要针叶树种类型为云杉(*Picea purpurea*)和冷杉(*Abies faxoniana*)。建国初期川西森林历经大规模采伐,天然林资源几近耗竭。在天然林保护工程和退耕还林(草)工程等生态恢复工程和森林经营管理的作用下,川西地区森林进入恢复阶段。

1.2 数据来源与预处理

本研究中涉及的数据包括气候/气象、二氧化碳、土壤类型、土地利用、地形以及植被等数据。2000—2020 年现行气候数据(包括最高温、最低温及降水数据)来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。光合有效辐射和二氧化碳浓度数据分别来自欧洲中期天气预报中心(<https://www.opentext.com/customers/european-centre-for-medium-range-weather-forecasting>)和地球系统研究实验室(ESRL, Earth System Research Laboratories)。RCP2.6 未来气候情景数据(2020—2070 年)采用 MIROC5 及 CSIRO_MK_3.6.0 数据集(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>)。土壤类型空间分布数据由中国科学院地理科学与资源研究所提供(<https://www.resdc.cn/>)。土地利用数据采用刘良云团队^[24]研发的 2000—2020 年全球 30m 精细地表覆盖动态监测产品。DEM 数据来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 90m。

本研究涉及的植被数据主要包括川西地区森林资源清查、野外实测数据、树种生活史、森林火灾及森林经营管理数据。森林资源清查数据由四川省林业和草原局提供,川西优势树种生活史数据主要来自于文献搜集及相关书籍查阅^[25—28],森林火灾及森林采伐迹地数据采用余恩旭^[29]基于 MODIS 遥感数据生成的 2002—2017 年西南地区森林火灾、森林采伐迹地空间分布数据集。其中树种和林龄空间分布数据是基于森林资源

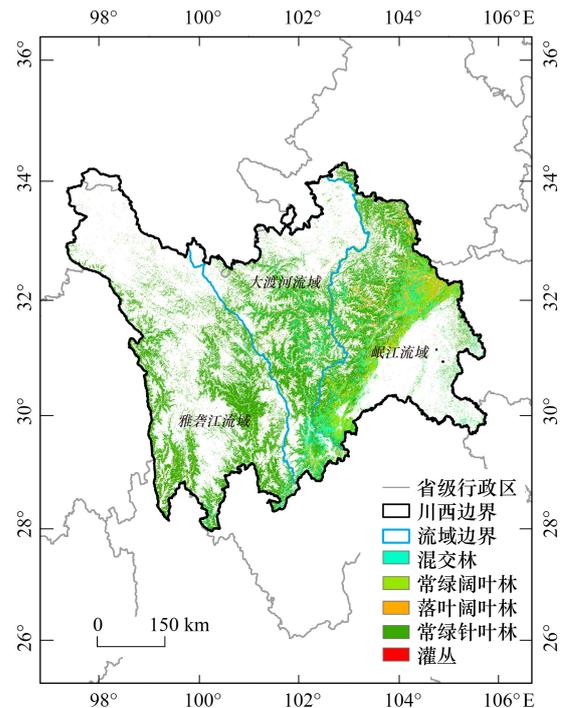


图 1 研究区概况

Fig.1 The location of study area

清查数据,通过小班随机赋值法生成。本研究分别在岷江、大渡河和雅砻江三个大流域中根据流域代表性树种和典型立地类型特征建立野外调查样地(图 2),布设方法见章节 1.3.3。所有数据空间分辨率在 ArcMap 10.2 中重采样至 500m。

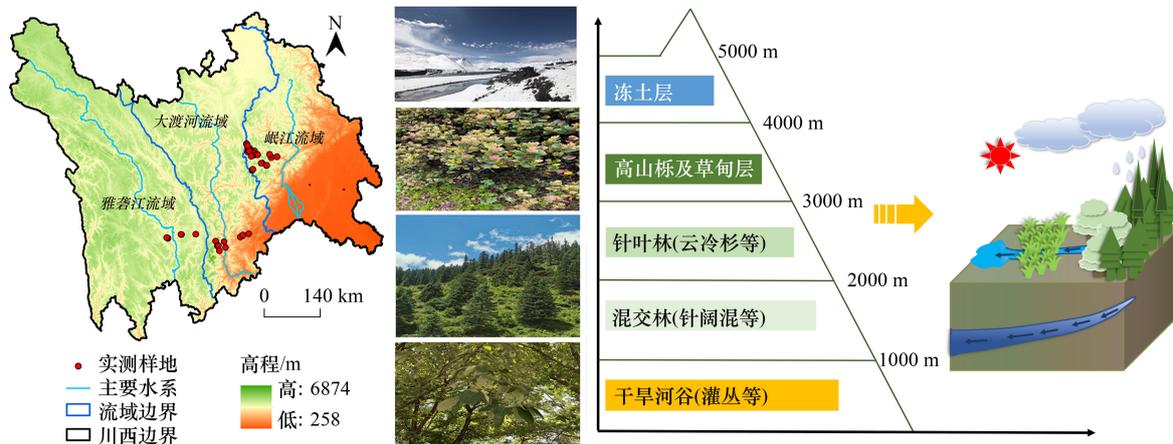


图 2 川西地区样地分布及立地垂直梯度特征

Fig.2 The in situ forest inventory sites and elevation gradient characteristics of land types in the western Sichuan Province

1.3 研究方法

本研究流程如图 3 所示。首先,根据川西地区基础数据构建模型空间数据库,涵盖川西地区立地类型图、物种组成图等空间数据及物种生活史等,并结合 PnET-II 模型得到不同立地特征下的物种建群系数,以此驱动 LANDIS PRO 并进行模型初始化校验。然后,模拟现行气候下川西地区森林地上碳储量并评价模型精度,进一步预测未来气候下自然和人工恢复情景下森林地上碳储量时空动态,最终筛选出提升区域碳汇能力的最佳适应性森林经营管理方案。

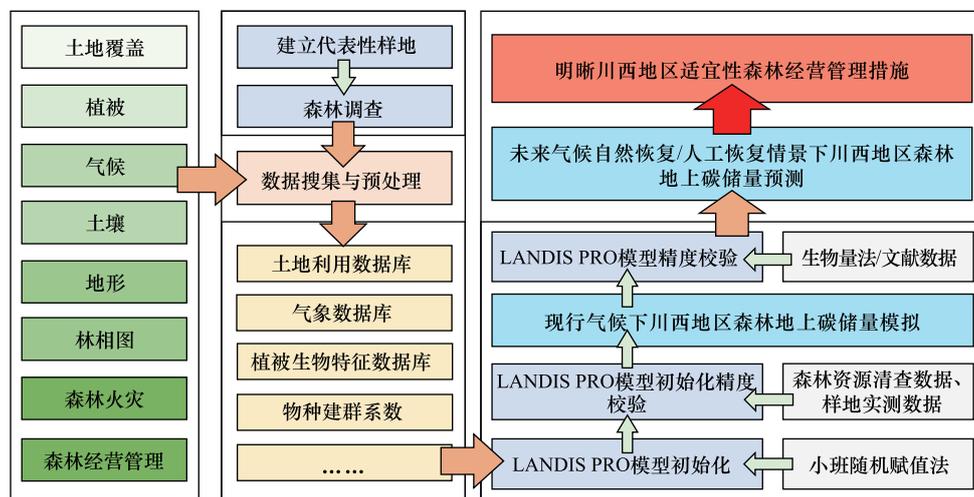


图 3 研究流程图

Fig.3 Research design

1.3.1 生物量法

本研究采用生物量法估算川西地区 2000—2020 年森林地上碳储量,用于对比验证 LANDIS PRO 模型精度。首先利用川西地区优势树种异速生长方程计算生物量,并基于国际生物量和碳储量的标准转换系数求得

碳储量(表2)。其中涉及的生长方程包括陈起忠等^[30]近三十年间基于森林调查、多种林木生长信息所提供的四川地区优势建群树种生长规律特征方程、Luo等^[31]统计的1978年至2013年间近200种树种类型的归一化生物量方程和王玲^[32]所提供的灌丛生长曲线方程。树种胸径及树高等基础信息根据森林清查数据、野外实测数据及已报道文献数据^[33-36]获取。川西地区优势树种异速生长方程信息如表2所示。

表2 川西地区优势树种异速生长方程

Table 2 Allometric equations for different dominant forest species in the western Sichuan Province

优势树种 Dominant forest species	参数 Parameter a	参数 Parameter b	生物量方程 Biomass equation	R ²
云杉 <i>Picea purpurea</i>	0.0485	0.9224	$W = a * (D^2 * H)^b$	0.98
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	0.0371	0.9278	$W = a * (D^2 * H)^b$	1.00
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.0980	2.4750	$W = a * D^b$	0.99
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	0.2655	0.7076	$W = a * (D^2 * H)^b$	0.99
华山松 <i>Pinus armandi</i>	-2.2962	2.4119	$\ln(W) = a + b * \ln(D)$	1.00
杉木 <i>Cunning-hamia lanceolate</i>	0.1456	2.0817	$W = a * D^b$	0.99
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	0.2045	0.7499	$W = a * (D^2 * H)^b$	0.97
青冈 <i>Quercus glauca</i>	0.1014	0.8771	$W = a * (D^2 * H)^b$	0.99
高山栎 <i>Quercus semecarpifolia</i>	0.0173	-0.0140	$W = a * (D^2 * H)^b$	0.99
楠木 <i>Phoebe zhennan</i>	0.4699	0.5382	$\lg(W) = a + b * \lg(D^2 * H)$	0.93
竹 <i>Bamboo</i>	0.5810	0.6170	$W = a * (D^2 * H)^b$	0.77
山杨 <i>Populus tremula</i>	1.3565	1.7185	$W = a * D^b$	0.96
桦木 <i>Betula platyphylla</i>	-1.8990	0.8114	$\ln(W) = a + b * \ln(D^2 * H)$	0.99
桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	0.0952	0.8473	$W = a * (D^2 * H)^b$	0.90

W: 树种生物量 Biomass (kg); D: 胸径 Dimeter at breast height (cm); H: 树高 Tree high (m)

1.3.2 LANDIS PRO 与 PnET-II 模型

LANDIS PRO 模型能够模拟大空间尺度(10³—10⁸hm²)、长时间序列(10—1000年)、多种生态过程(如森林演替、种子传播、火灾和采伐等经营管理措施)综合作用下的森林景观变化及地上碳储量动态^[37]。本研究运用 LANDIS PRO 模型,模拟预测了现行气候(2000—2020年)和未来气候(2020—2070年)不同森林恢复情景下川西地区森林演替过程以及地上碳储量(ACS)及碳密度(碳储量/面积)的时空动态^[19, 38]。其中,森林恢复情景包括自然恢复情景(仅考虑森林自然演替及林火干扰)及人工恢复措施情景(森林自然演替、经营管理及林火干扰)。模型的输入主要包含流域树种生活史(表3)和流域立地特征(表4)等,详细信息可参考(<https://cafncfaculty.missouri.edu/gislab/landis/>)。PnET-II 模型(<https://www.pnet.sr.unh.edu>)是基于过程的森林生态系统碳-水动态模型^[39],可通过应用光照(有效光合辐射)、温度(当前温度与特定物种的最佳光合作用温度的偏差)、水供应(降水输入)、水蒸气亏缺和 CO₂ 等因子来模拟气候变化对森林光合作用的影响^[39]。本研究使用 PnET-II 模型生成现行及未来气候下川西地区优势树种在不同立地条件下的建群系数,以表征物种在传播种子时的建群概率。

1.3.3 样地设置及模型初始化精度校验

2019年10月—2022年7月在川西地区的雅江县、泸定县、康定县、天全县、米亚罗等地区选择代表性区域(如不同坡面和树种)进行群落调查(图2),如以暗针叶冷杉林为代表的天然针叶纯林、云冷杉混交林、常绿阔叶林、针阔混交林等,基本涵盖川西地区主要植被类型和优势树种。建立了一级调查样地(20m×20m)62个和二级调查样地(5m×5m)992个,样地间海拔跨度较大,能够较充分地反映川西地区立地类型特征。林分小班实测数据(包括树高、胸径、郁闭度等)将被用于植被信息参数化及模型精度校验。

LANDIS PRO 模型要求输入像元尺度的植被空间分布信息(树种、龄组)。本研究根据样地信息采用小班随机赋值法初始化模型,即利用小班内的物种组成比例生成0—100范围内的随机数,按该比例将研究区内的树种信息随机赋值到各像元^[17]。本研究中多次重复运行基于小班的随机赋值法^[17],并从初始化的物种类型

图中随机取值与对应的野外样地森林调查数据进行对比验证。

表 3 川西地区不同优势树种生活史

Table 3 Attributes of different dominant forest species in the western Sichuan Province

优势树种 Dominant forest species	LONG/a	MATUR/a	SHADE	FIRE	EFFD/m	MAXD/cm	SPT
云杉 <i>Picea purpurea</i>	420	80	4	2	80	120	1
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	460	80	4	2	80	150	1
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	260	40	4	4	100	100	1
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	500	40	4	2	100	200	1
华山松 <i>Pinus armandi</i>	70	40	3	4	100	100	1
杉木 <i>Cunning-hamia lanceolate</i>	200	10	5	1	200	300	1
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	500	50	1	2	70	150	1
青冈 <i>Quercus glauca</i>	300	10	4	3	200	100	0
高山栎 <i>Quercus semecarpifolia</i>	120	20	4	4	200	40	0
楠木 <i>Phoebe zhennan</i>	1000	50	5	5	40	100	0
竹 <i>Bamboo</i>	60	10	2	1	250	15	0
山杨 <i>Populus tremula</i>	150	30	1	1	200	60	0
桦木 <i>Betula platyphylla</i>	150	20	1	2	200	100	0
桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	125	10	3	3	150	120	0

LONG: 树种寿命 Longevity of the forest species; MATUR: 树种成熟年龄 Maturity age of the forest species; SHADE: 树种耐阴度(等级为 1—5, 1 为最不耐阴, 5 为最能耐阴) Shade tolerance value(1—5). 1=least tolerant, 5=most tolerant; FIRE: 耐火度(等级为 1—5, 1 为最不耐火, 5 为最能耐火) Fire tolerance value(1—5). 1= lowest tolerance, 5=highest tolerance; EFFD: 种子有效传播距离 Effective seed dispersal distance; MAXD: 最大平均胸径 Maximum diameter at breast height; SPT: 树种类型(1 为针叶林, 0 为阔叶林) Species type (value is 1 for coniferous forests, 0 for broadleaf forests)

表 4 川西地区立地类型分布特征

Table 4 Land types characteristics of the western Sichuan Province

立地类型 Land type	比例 Ratio/%	面积 Area/10 ³ km ²
非林地 Non-forested	62.32	183.68
干旱河谷区 Arid valley	1.46	4.31
海拔 Altitude <1000m, 南坡 southern slope	0.84	2.49
海拔 Altitude <1000m, 北坡 northern slope	0.83	2.45
1000m< 海拔 Altitude <2500m, 阳坡 southern slope	3.23	9.51
1000m< 海拔 Altitude <2500m, 阴坡 northern slope	3.63	10.69
2500m< 海拔 Altitude <4000m, 阳坡 southern slope	9.52	28.06
2500m< 海拔 Altitude <4000m, 阴坡 northern slope	9.84	29.01
高山草甸区 Alpine meadow areas (>4000m)	8.32	24.52

1.3.4 森林经营管理情景设定

森林经营管理(如抚育、抚育采伐及补植经营等)能通过人工调控建立合理的森林结构体系,以长期维持并加强森林生态系统生产力,进而提高森林碳汇能力^[18, 23, 26, 40]。森林抚育对象主要是人工中幼林,通过割灌除草辅以人工修枝抚育^[23]。抚育采伐通过对林分进行定向疏伐和修剪,包括移栽、横截枝、修枝、整木、杂木伐等措施,改造主要针对经营效果不佳、低效纯林以及病虫害害林,有利于促进树木的生长和发育、提升森林固碳效益、强化森林生态系统多重服务功能^[40]。川西地区原始针叶林经采伐后,森林恢复成以低固碳能力的天然次生阔叶和针阔混交林以及稳定性差的人工针叶林为主^[23]。阔叶树的快速更新抑制了云、冷杉主要森林固碳树种的生长。为提高区域固碳能力、确保幼苗生长成林,本研究主要对云、冷杉林采取抚育采伐、抚育和补植经营^[26],其他类型的树种(人工云杉中幼林)以抚育采伐、自然恢复为主。模型中选取基于树木胸高断面积的采伐规则,即从蓄积量高的林分开始采伐,各林分内按从小到大的树木胸高断面积顺序进行,直至达到规定的管理区采伐面积水平时停止,主要针对中幼龄林进行林下小树择伐^[26, 41—42]。结合区域历史火灾干扰和森林经营管理水平,本研究确定了相应的火灾干扰和森林经营管理面积比例,构建了未来气候下川西地区森林恢复的两种主要模式——自然恢复和人工恢复(表 5)。自然恢复情景模拟森林无任何人为干扰下的

自然演替过程,只考虑种子传播、种间竞争以及森林火灾对森林的影响,林火干扰的强度等级范围为 0.01/10a—0.05/10a。人工恢复情景则包括森林干扰和森林经营管理。本研究针对云杉和冷杉的不同管理比例(1:1, 1:0, 0:1)提出了森林干扰及森林经营管理措施组合方案,林火干扰和森林经营管理水平强度范围均为 0.01/10a—0.05/10a。最终基于 LANDIS PRO 实现现行气候及未来气候情景下研究区森林碳储量的模拟及预测。

表 5 川西地区森林恢复措施方案

Table 5 Forest restoration measures in the western Sichuan Province

森林变化 Forest change	现行气候 Current climate	未来气候 Future climate		
		自然恢复 Natural recovery	人工恢复 Artificial recovery	
火灾干扰 Fire disturbance	面积比例	0.02/10a ^[43]	0.01—0.05/10a	0.01—0.05/10a
森林经营管理 Forest management	面积比例	0.02/10a ^[44]	—	0.01—0.05/10a
	管理方式	抚育采伐+补植	—	抚育采伐+补植

表中未来自然恢复情景为仅发生森林干扰下的森林演替进程,干扰水平与现行气候干扰水平一致,为 0.02/10a

2 研究结果

2.1 LANDIS PRO 模型率定及校验

本研究结合森林资源清查数据和样地实测数据对模型模拟结果进行模型初始化校验。据表 6 所示,样地水平上实测数据与模拟结果两者吻合度达到 86.67%,模型初始化精度较高,从而进一步得到现行气候下川西地区地上碳储量空间分布。此外,本研究结合传统的生物量法与 LANDIS PRO 模型模拟结果进行交叉对比评估发现前期(2000—2009 年)两种方法所估算的川西地区植被 ACS 不存在显著差异($P>0.05$),而 2010 年后基于生物量法的森林碳储量显著偏高(图 4)($P<0.05$)。

表 6 LANDIS PRO 模型初始化精度检验结果

Table 6 LANDIS PRO model initialization accuracy test results

植被类型 Vegetation type	优势树种 Dominant forest species	一级样地 Sample plots/个	二级样地 Subplots/个	随机样点 Random sites/个	吻合样点个数 Number of matched sites/个	精度 Accuracy/%
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	云杉 <i>Picea purpurea</i>	11	176	16	15	93.75
	冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	10	160	16	14	87.50
	杉木 <i>Cunning-hamia lanceolata</i>	3	48	16	14	87.50
	柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	4	64	16	12	75.00
	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	3	48	16	14	87.50
	华山松 <i>Pinus armandii</i>	1	16	16	12	75.00
	柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1	16	16	13	81.25
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	青冈 <i>Quercus glauca</i>	1	16	16	15	93.75
	高山栎 <i>Quercus semecarpifolia</i>	5	80	16	14	87.50
	楠木 <i>Phoebe zhennan</i>	2	32	16	14	87.50
	竹 <i>Bamboo</i>	1	16	16	13	81.25
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	山杨 <i>Populus tremula</i>	5	80	16	14	87.50
	桦木 <i>Betula platyphylla</i>	7	112	16	14	87.50
	桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	5	80	16	15	93.75
灌丛 Shrub	小蓬草等 <i>Conyza canadensis</i>	3	48	16	15	93.75
合计 Total	—	62	992	240	208	86.67

2.2 川西地区森林碳储量现状

2000—2020 年间,川西地区森林(包括乔木层及灌丛)ACS 空间变异较强(图 5)。岷江流域森林 ACS 最高,其次为大渡河流域,雅砻江流域森林碳储量最低。其中,海拔低于 4000m 的林区碳储量显著上升($P < 0.01$),尤其以岷江林区碳储量上升趋势最为显著(图 5)。20a 间,川西地区森林 ACS 随森林面积显著增加而提升($P < 0.01$),2020 年森林 ACS(466.99Tg)较 2000 年(344.62Tg)显著提升了 35.51%。但现行气候下川西地区森林碳密度呈显著下降趋势($P < 0.01$),年均下降 1.22 Mg/hm²(图 5)。

川西地区 20 年间不同森林类型、林龄及树种的平均 ACS 及碳密度存在差异。森林类型方面,森林地上碳储量及碳密度表现为常绿针叶林(ECF) > 混交林(MF) > 落叶阔叶林(DBF) > 常绿阔叶林(EBF)(图 6)。ECF 为林区主要固碳森林类型,其碳储量占森林总碳储量的 71.10%。不同林龄的 ACS 及碳密度表现为过熟林 > 成熟林 > 中龄林 > 近熟林 > 幼龄林,其中过熟林与成熟林的 ACS 分别占森林总碳储量的 37.58% 及 29.02%(图 6)。树种方面,云、冷杉林平均 ACS 分别占植被碳储量的 24.55% 及 40.02%,是该地区植被碳储量的主要贡献者(表 7)。

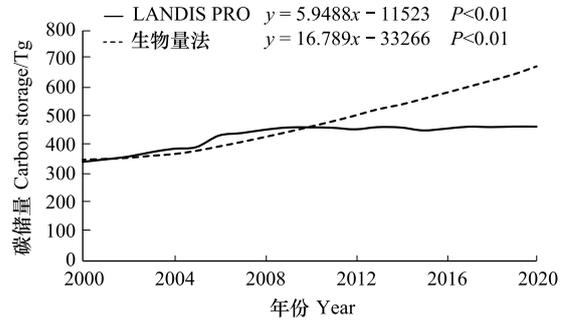


图 4 生物量法及模型法模拟结果对比
Fig.4 Comparison of forest ACS results based on the biomass method and LANDIS PRO

LANDIS PRO: 一种基于过程的森林景观空间模型 A process-based spatially explicit forest landscape model; ACS: 地上碳储量 Aboveground carbon storage

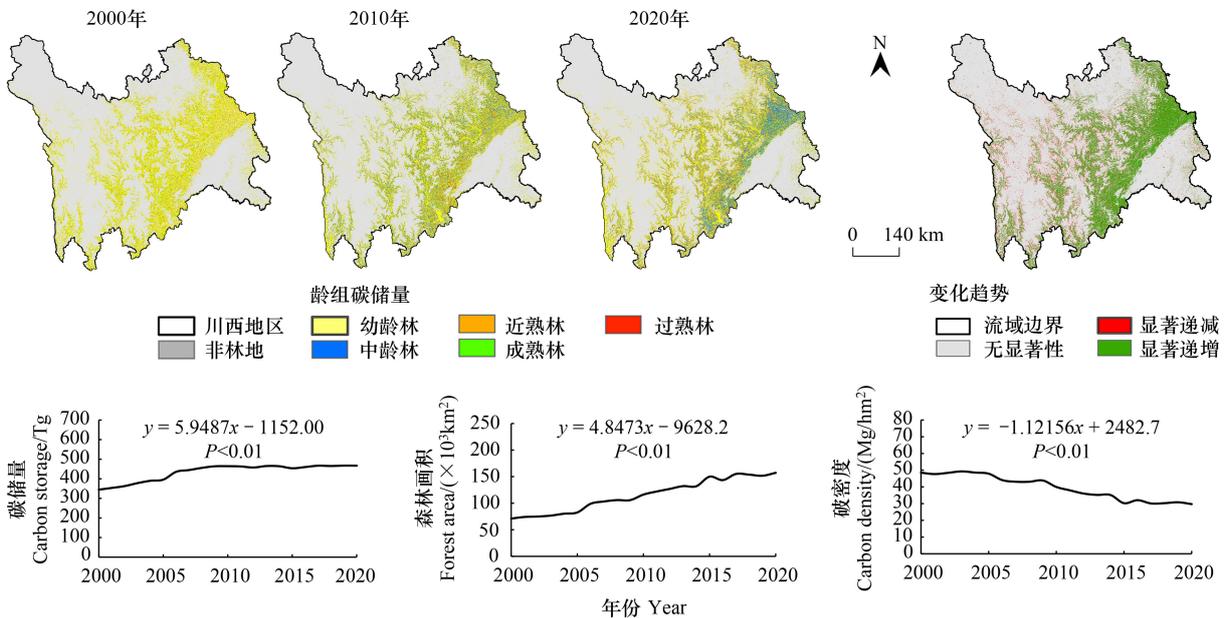


图 5 2000—2020 年川西地区森林地上碳储量空间格局、空间变化趋势及时间变化趋势

Fig.5 Spatiotemporal variations of forest ACS spatial patterns, spatial trends and temporal trends in the western Sichuan Province from 2000 to 2020

2.3 未来气候下川西地区森林碳储量预测

2020—2070 年,自然恢复情景下川西地区森林 ACS 空间分布格局与 2000—2020 年现行气候川西地区森林 ACS 分布相似(图 5 和图 7)。大部分区域森林碳储量呈显著上升趋势($P < 0.01$)。其中仍以岷江流域上升趋势最为明显。同时,未来气候下川西地区干旱河谷局地植被 ACS 呈显著上升趋势($P < 0.01$)(图 7)。未来气

候下随着川西地区森林覆盖面积显著提升 ($P < 0.01$), 森林地上碳储量将由 466.99Tg (2020 年) 提升至 780.96Tg (2070 年), 显著增加了 67.23%, 平均 5 年提升 6.72% (图 7); 与现状不同的是该林区平均碳密度 2030 年后开始增长, 其中 2040—2050 年增长较快, 平均碳密度较 2020—2030 年高 1.39Mg/hm²; 后期增速放缓, 甚至下降, 2060—2070 年森林平均碳密度较 2050—2060 年低 0.15Mg/hm²。其中乔木层碳密度变化主导区域森林碳密度变化(表 8)。

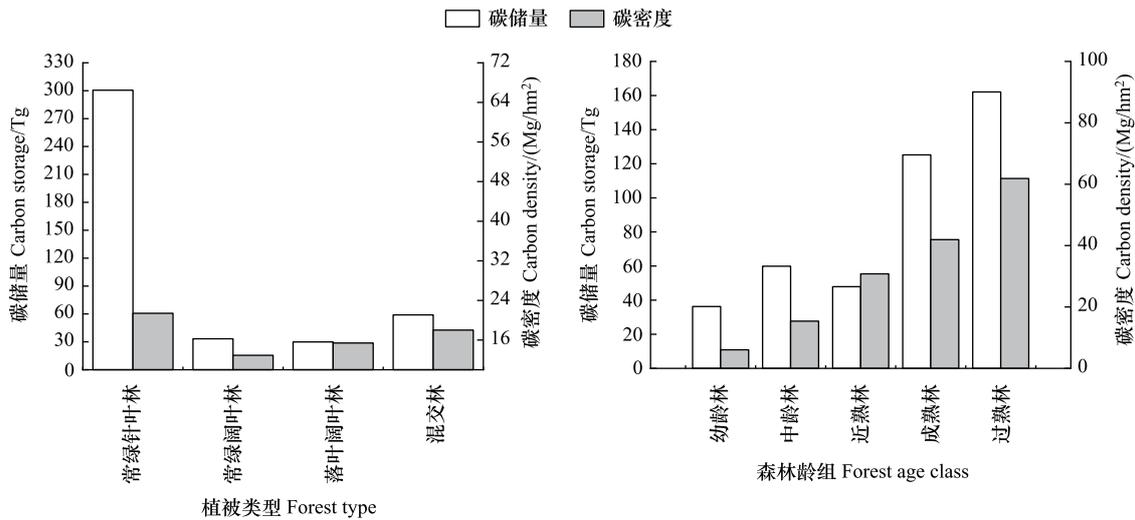


图 6 2000—2020 年川西地区林区不同植被类型及不同龄组地上平均碳储量与碳密度

Fig.6 Average forest ACS and carbon density of different forest types and age classes in the western Sichuan Province from 2000 to 2020

表 7 2000—2020 年川西地区不同树种多年平均碳储量

Table 7 Average ACS capacity of different vegetation types in the western Sichuan Province from 2000 to 2020

树种 Forest species	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	树种 Forest species	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)
云杉 <i>Picea purpurea</i>	105.51	77.19	青冈 <i>Quercus glauca</i>	18.47	21.03
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	171.99	94.34	高山栎 <i>Quercus semecarpifolia</i>	3.48	7.09
杉木 <i>Cunning-hamia lanceolata</i>	19.17	28.63	楠木 <i>Phoebe zhenan</i>	2.49	25.71
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	8.53	30.05	竹 <i>Bamboo</i>	9.06	17.20
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	20.70	27.20	山杨 <i>Populus tremula</i>	1.90	18.38
华山松 <i>Pinus armandii</i>	18.46	33.82	桦木 <i>Betula platyphylla</i>	15.99	30.09
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	25.58	21.50	桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	8.45	27.01

ACS:地上碳储量 Aboveground carbon storage

未来川西地区不同森林类型、林龄及树种的平均 ACS 及碳密度同样存在差异。不同森林类型的逐年碳增量速率表现为 ECF>EBF>MF>DBF, 植被平均碳密度为 ECF>MF>DBF>EBF (表 9)。相较于 2000—2020 年, 2020—2070 年 ECF 多年平均碳储量占比将降低至 59.86%, 而 EBF、DBF 及 MF 碳储量占比逐渐上升 (图 6 和表 9)。其中 EBF 碳储量提升较快, 多年平均碳储量占比将提升至 18.86%。不同龄组方面 (表 10), 高碳储量龄组植被 (成熟、过熟林) 的覆盖面积逐渐下降, 而新生中、幼龄林不断进行林下更新 (图 7), 研究区森林总面积不断扩张。原幼龄、中龄、近熟林逐渐更新为近熟、成熟、过熟林, 区域森林总碳储量不断提高 (图 7 和表 10)。树种方面 (表 11), 云冷杉林多年平均碳储量分别占总碳储量的 23.04% 及 29.63%, 仍为该林区地上碳储量的主要树种。综上, 未来川西林区碳储量增加主要以乔木为主, 灌木覆盖面积及碳储量随着演替、生长空间压缩等影响逐渐达到饱和。

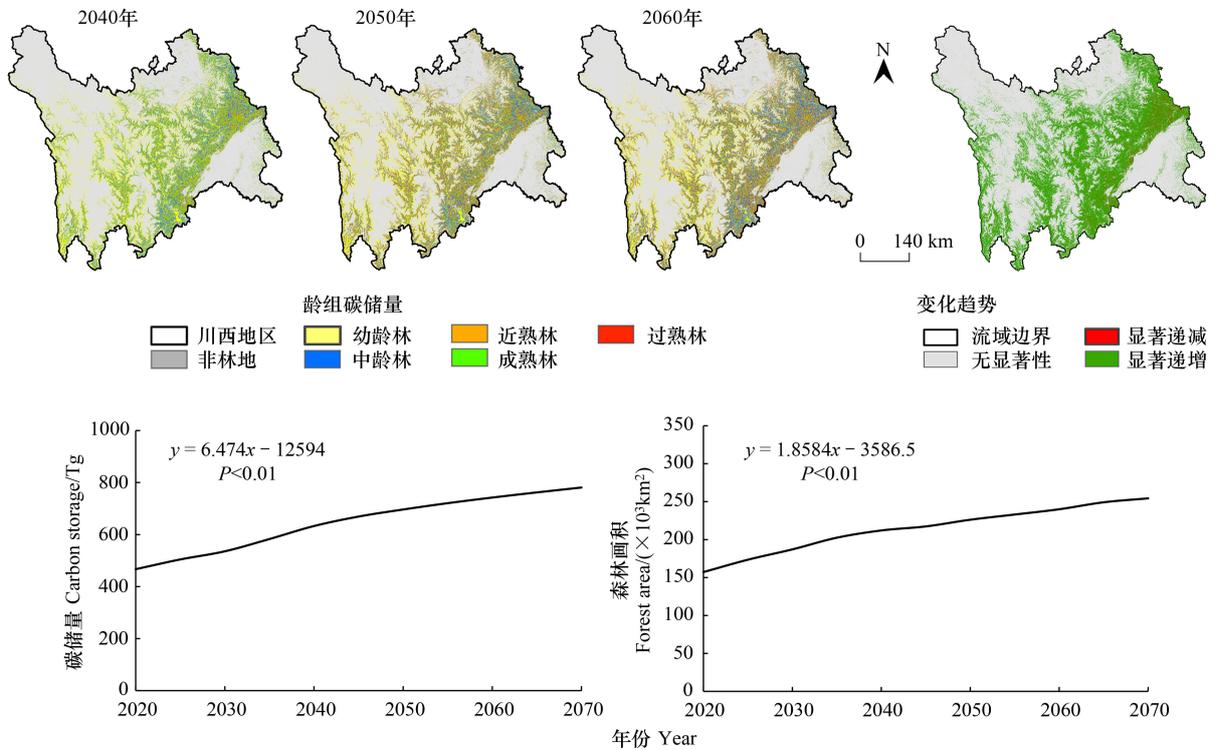


图7 2020—2070年自然恢复情景下川西地区森林地上碳储量空间格局、空间变化趋势和时间变化趋势

Fig.7 Spatiotemporal variations of ACS spatial patterns, spatial trends and temporal trends under natural recovery scenarios in the western Sichuan Province from 2020 to 2070

表8 2020—2070年自然恢复情景下川西地区森林、乔木和灌木碳储量

Table 8 ACS of forest, tree and shrub under natural recovery scenarios in the western Sichuan Province from 2020 to 2070

年份 Year	森林 Forest		乔木 Tree layer		灌木 Shrub	
	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)
2020—2030	502.37	29.10	497.63	37.42	4.74	1.20
2030—2040	583.80	29.11	579.05	35.93	4.74	1.20
2040—2050	666.25	30.49	661.50	36.94	4.74	1.20
2050—2060	719.89	30.89	715.15	36.94	4.74	1.20
2060—2070	761.86	30.74	757.12	36.34	4.74	1.20

表中森林、乔木层及灌木的地上碳储量、碳密度为对应研究时段的均值

表9 2020—2070年自然恢复情景下川西地区不同森林类型碳储量

Table 9 ACS of different forest types under natural recovery scenarios in the western Sichuan Province from 2020 to 2070

年份 Year	ECF _c / Tg	ECF _d / (Mg/hm ²)	EBF _c / Tg	EBF _d / (Mg/hm ²)	DBF _c / Tg	DBF _d / (Mg/hm ²)	MF _c / Tg	MF _d / (Mg/hm ²)
2020—2030	319.01	52.64	66.77	17.01	42.02	25.68	69.83	41.59
2030—2040	347.58	44.93	103.85	22.46	45.82	27.58	81.80	39.05
2040—2050	397.18	42.78	126.75	26.66	46.33	30.09	91.24	39.20
2050—2060	421.79	42.17	145.79	28.77	50.42	28.41	97.15	38.60
2060—2070	433.66	41.50	165.37	30.34	56.17	25.23	101.91	37.63

ECF_c:常绿针叶林碳储量 Carbon storage of evergreen coniferous forest;EBF_c:常绿阔叶林碳储量 Carbon storage of evergreen broad-leaved forest; DBF_c:落叶阔叶林碳储量 Carbon storage of deciduous broad-leaved forest;MF_c:混交林碳储量 Carbon storage of mixed forest;ECF_d:常绿针叶林碳密度 Carbon density of evergreen coniferous forest;EBF_d:常绿阔叶林碳密度 Carbon density of evergreen broad-leaved forest;DBF_d:落叶阔叶林碳密度 Carbon density of deciduous broad-leaved forest;MF_d:混交林碳密度 Carbon density of mixed forest;表中不同森林类型的碳储量、碳密度为对应研究时段的均值

表 10 2020—2070 年自然恢复情景下川西地区植被各龄组碳储量

Table 10 ACS capacity of forest at different age classes under natural recovery scenarios in the western Sichuan Province from 2020 to 2070

年份 Year	幼龄 Young		中龄 Middle-aged		近熟 Near-Mature aged		成熟 Mature-aged		过熟 Over-Mature aged	
	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)
2020—2030	35.96	7.72	66.61	23.46	57.91	42.36	149.22	61.22	187.93	94.09
2030—2040	45.04	6.79	88.60	21.72	75.07	55.68	167.90	71.26	202.44	119.30
2040—2050	56.64	7.36	113.24	21.67	92.90	70.96	183.72	88.38	215.00	135.03
2050—2060	65.31	7.38	128.14	23.23	104.86	72.60	193.80	99.21	223.05	139.25
2060—2070	70.26	7.03	135.31	23.15	112.70	74.27	204.50	110.70	234.35	143.12

表中植被各龄组的碳储量、碳密度为相应研究时段的均值

表 11 2020—2070 年川西地区自然恢复情景下不同植被类型多年平均碳汇情况

Table 11 Average ACS capacity of different vegetation types under natural recovery scenarios in the western Sichuan Province from 2020 to 2070

树种 Forest species	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)	树种 Forest species	碳储量 ACS/Tg	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm ²)
云杉 <i>Picea purpurea</i>	147.49	80.75	青冈 <i>Quercus glauca</i>	68.07	35.02
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	189.72	136.10	高山栎 <i>Quercus semecarpifolia</i>	10.08	10.61
杉木 <i>Cunning-hamia lanceolata</i>	44.58	27.08	楠木 <i>Phoebe zhennan</i>	35.00	45.18
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	20.10	22.24	竹 <i>Bamboo</i>	7.58	7.01
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	24.14	14.56	山杨 <i>Populus tremula</i>	7.13	19.95
华山松 <i>Pinus armandii</i>	22.34	17.74	桦木 <i>Betula platyphylla</i>	23.44	27.38
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	22.90	10.40	桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	17.70	30.33

2.4 川西地区适应性森林经营管理措施方案评估

通过对比川西地区不同森林干扰、森林经营管理水平下森林地上碳储量较自然恢复模式变化情况(表 12)发现,就不同的林火干扰水平而言,当林火干扰比例为 0.01/10a 且云杉:冷杉森林经营管理面积为 1:0 时,森林 ACS 较自然恢复情况提升最高。该人工恢复措施情景下,2020 年川西林区 ACS 将由 466.99Tg 提升至 806.90Tg,增加了 72.79%,平均 5 年提升 7.28%。人工恢复措施下川西林区 ACS 相对自然恢复情景平均每 5 年高 3.35%(22.32Tg)(表 12)。同时,随着森林火灾干扰面积的扩张,该地区森林碳储量将会逐渐下降。就不同森林经营管理措施而言,当森林经营管理措施比例为 0.02/10a 且云杉:冷杉森林经营管理面积为 1:0 时林区碳储量最高。该人工恢复措施情景下,2020—2070 年川西林区 ACS 将由 466.99Tg 提升至 803.39Tg,增加了 72.03%,平均 5 年提升 7.20%。相对自然恢复,实施人工恢复措施后川西林区 ACS 平均 5 年将增加 3.10%(20.53Tg)(表 12)。因此,综合林火干扰和森林经营管理措施的影响结果,当森林干扰比例为 0.01/10a、森林经营管理措施比例为 0.02/10a 且云杉:冷杉森林经营管理面积为 1:0 时,区域森林地上碳储量增量最大,为提升区域森林碳储量的最佳林火干扰和森林经营管理措施组合。

图 8 对比了最佳人工恢复措施情景与自然恢复后川西地区森林地上碳储量与碳密度的变化趋势。该人工恢复情景下,2020—2070 年研究区森林地上 ACS 将由 466.99Tg 提升至 807.76Tg。相对 2020 年,2070 年森林地上碳储量增加了 72.97%,平均 5 年将提高 7.30%(图 8)。相对自然恢复,2070 年森林地上碳储量将提升 26.79Tg,平均 5 年将增加 3.47%(23.14Tg)(图 8)。与此同时,自然恢复和人工恢复情景下的森林碳密度变化趋势存在差异。自然恢复下研究区森林碳密度前期(2020—2030 年)逐渐下降,2030—2045 年快速上升,而后期逐渐平稳甚至呈现下降趋势(图 8)。平均森林碳密度由 29.71Mg/hm²(2020 年)降低至 28.63Mg/hm²

(2030年)再增加至 30.71Mg/hm²(2070年)。2070年自然恢复情景下森林平均碳密度较2020年提升了3.37%,平均5年提高了0.35%。而实施人工恢复措施后,该地区森林碳密度不断提升,由29.71Mg/hm²(2020年)增加至33.33Mg/hm²(2070年),增加了12.21%,平均5年增加1.17%。其中前期(2020—2030年)森林碳密度变化不明显,中期(2030—2045年)增加较快,后期(2045—2070年)增速放缓但仍持续上升(图8)。到2070年,人工恢复下森林碳密度较自然恢复高8.5%。

表 12 2020—2070 年人工恢复情景下川西森林地上碳储量与自然恢复情景的比较

Table 12 Forest ACS enhancements in artificially restored relative to natural recovery in the western Sichuan Province, 2020—2070

经营管理水平 Management level/10a	干扰水平 Disturbance level/10a	云杉:冷杉=1:1 Spruce: fir=1:1/(%/5a) ⁽³⁾	云杉:冷杉=1:0 Spruce: fir=1:0/(%/5a) ⁽³⁾	云杉:冷杉=0:1 Spruce: fir=0:1/(%/5a) ⁽³⁾
Mgt_0.01—0.05 ⁽¹⁾	Fire_0.01	3.25 (805.94)	3.35 (806.90)	3.27 (806.13)
	Fire_0.02	3.11 (804.01)	3.20 (805.09)	3.11 (803.87)
	Fire_0.03	2.96 (802.09)	3.04 (803.20)	2.96 (802.05)
	Fire_0.04	2.82 (799.99)	2.87 (800.85)	2.83 (800.13)
	Fire_0.05	2.71 (798.42)	2.74 (798.91)	2.71 (798.42)
干扰水平 Disturbance level/10a	经营管理水平 Management level/10a	云杉:冷杉=1:1 Spruce: fir=1:1/(%/5a) ⁽³⁾	云杉:冷杉=1:0 Spruce: fir=1:0/(%/5a) ⁽³⁾	云杉:冷杉=0:1 Spruce: fir=0:1/(%/5a) ⁽³⁾
Fire_0.01—0.05 ⁽²⁾	Mgt_0.01	2.96 (802.07)	3.03 (802.89)	2.97 (802.08)
	Mgt_0.02	2.97 (802.12)	3.10 (803.39)	2.97 (802.04)
	Mgt_0.03	2.97 (802.07)	3.03 (802.86)	2.98 (802.18)
	Mgt_0.04	2.97 (802.07)	3.03 (802.92)	2.98 (802.13)
	Mgt_0.05	2.98 (802.14)	3.03 (802.89)	2.98 (802.18)

表中(1)平均森林经营管理水平;(2)平均林火干扰水平;(3)2020—2070年不同人工恢复措施下森林地上碳储量相对现行干扰水平下自然恢复平均提升情况,括号内为人工恢复后2070年林区地上碳储量,单位:Tg

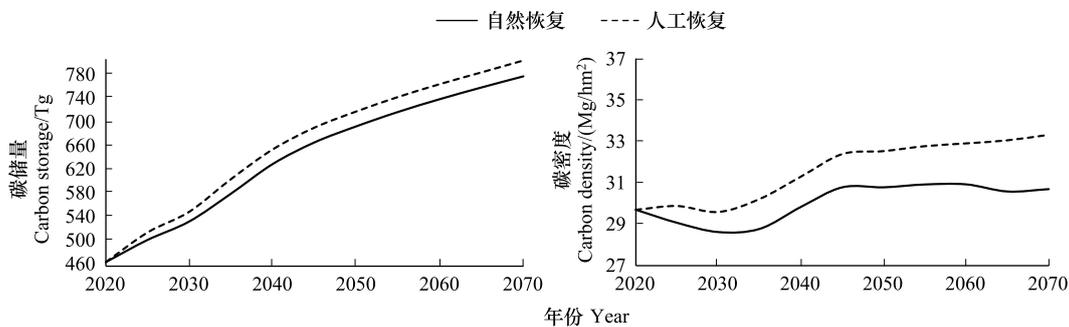


图 8 2020—2070 年川西林区自然恢复与人工恢复情景下森林地上碳储量和碳密度变化趋势

Fig.8 Trends of ACS and carbon density under natural and artificial recovery scenarios in the western Sichuan Province from 2020 to 2070

3 讨论

3.1 LANDIS PRO 模型适用性评价

据模型初始化结果表明,样地水平上实测数据与模拟结果两者吻合度达到 86.67%(表 6)。本研究使用模型模拟的现行气候下川西地区森林地上碳储量在区域尺度上与 Chen 等人^[45]估算的 2000—2017 年成都市、德阳市、绵阳市、雅安市、资阳市、阿坝藏族自治州和甘孜藏族自治州的碳储量结果无显著差异($P > 0.05$);其中,2013 和 2014 年川西地区植被平均碳密度分别为 44.83Mg/hm²和 44.78Mg/hm²,与邵波^[46]、胡峻嶒等人^[3]基于森林清查数据研究的结果基本一致。上述研究表明 LANDIS PRO 模拟结果具有较高的准确性,在川西地区具有较好的适用性,可用于揭示区域森林碳储量的长期动态。此外,本研究中生物量法与模拟

方法的结果对比表明前期两种方法得到的森林 ACS 不存在显著差异 ($P>0.05$), 但 2010 年后基于生物量法的森林碳储量显著偏高 (图 4) ($P<0.05$)。这可能归因于经验性方程模型无法从机理上反映多种干扰下真实的森林演替过程以及气候变化和森林干扰的影响 (表 1)^[47]。因此, 本文采用耦合气候-植被变化过程的森林景观模型 LANDIS PRO, 结合森林清查资源与野外林分调查信息, 融入森林变化 (演替、干扰) 和森林经营管理措施, 从机理上认识森林植被碳储量的变化, 能够客观反映森林生态过程的真实动态。

3.2 现行气候下川西地区森林地上碳储量动态及其驱动因素

“天保工程”和“退耕还林”生态修复工程的实施使川西地区森林生态系统的固碳能力逐渐恢复。2000—2020 年, 该地区森林碳储量提升显著^[3, 48], 20a 间地上碳储量增加 122.37Tg。空间上, 川西地区岷江流域林区地上碳储量较高且不断提升。岷江流域暖湿条件为植被提供适宜的生长环境^[26]使该地区植被恢复效果远优于大渡河流域和雅砻江流域 (图 1 和图 5), 森林固碳能力最强。

研究期间, 随着川西地区森林面积逐渐增加, 林区碳储量不断提高, 呈现前期增长较快、后期放缓的变化趋势, 但是森林碳密度早期变化较为平缓、后期逐渐下降。碳储量和碳密度的波动通常与研究区森林结构特征变化有关^[38]。老龄林树体庞大、林分结构复杂、抗干扰能力及固持二氧化碳能力较强。植被演替和人工造林使得川西地区森林面积增加 (图 5)。虽然林分演替和森林干扰导致老龄林面积增长缓慢^[49], 但部分中龄林、近熟林不断向老龄林转化确保了老龄林在区域碳储量的主要贡献地位。此外, 新增的中幼龄林因前期生长空间和资源充足, 碳储量累积速率较快, 能够弥补林区因老龄林死亡引起的碳损失, 因此林区地上总碳储量逐渐增加 (图 5)。常绿针叶林占川西地区森林面积的 79.24% (图 1), 是区域森林碳储量的主体。其中云杉和冷杉的碳储量最高, 贡献率超过 60%。生态恢复工程和森林经营管理措施的实施在一定程度上降低了云杉林和原始冷杉林受干扰概率, 确保其稳定增长。同时, 冷杉和云杉的叶面积指数较高且四季落针较少, 光合作用较强^[19]。因此, 相较于其他树种, 以云杉、冷杉为主的常绿针叶林具有较高的碳储量。虽然近年来大面积的人工造林提高了川西地区植被覆盖率, 但大部分植被正处于生长初期阶段, 其幼龄林面积覆盖比例不断增加 (图 5), 降低了川西地区森林平均碳密度 (图 5)。由此可见, 川西地区森林林龄趋于年轻化 (平均林龄 40a)^[50], 具有巨大碳汇提升潜力。

3.3 未来气候下川西地区森林地上碳储量变化及对森林经营管理启示

川西地区高山、亚高山森林碳储量将会受气候暖干化趋势的影响而表现出不同的时空分布规律。岷江上游地区植被覆盖率较高, 其碳储量依然较大 (图 7)。川西干旱河谷地带植被碳储量持续上升揭示了植被生长与气候变化的适应机制。因此, 未来进行森林恢复时应当充分考虑不同恢复情景下地区植被固碳对气候变化的响应机制。

自然恢复情景下, 中幼林不断向老龄林转变, 林区地上碳储量呈显著上升趋势 (图 7)。其中不同树种的碳汇能力存在差异 (表 11)。研究表明, 未来川西地区云、冷杉林覆盖较广, 仍是林区地上碳储量的主要贡献者 (表 11); 油松、华山松等喜阳针叶树种受其生长特性的影响^[26], 总体表现为单位面积碳储量随时间的推移逐渐下降; 青冈树因耐旱且生命力强, 早期幼龄青冈树面积迅速扩增导致其碳密度较低^[27], 未来随近熟林、成熟林增加, 青冈树平均碳密度将持续提升 (表 7 和表 11)。青冈树可成为未来气候情景下川西地区提升森林碳汇的优选造林树种。就不同龄组的碳汇能力而言, 川西地区老龄林碳储量仍为最高 (表 10)。但 2020—2070 年间区域森林碳密度则呈现早期减少、中期增加、后期平稳甚至减少的动态变化特征。这是由于生物量较高的老龄林面积增加速率较慢且逐渐走向死亡进程, 新生幼苗演替面积较大但生物量相对较低, 导致自然恢复情景下该地区前期 (2020—2030 年) 森林碳密度逐渐下降 (图 8)。虽然 2030—2045 年随着幼苗更新生长进入中龄林, 该地区森林碳密度快速上升, 但后期 (2045—2070 年) 受限于生长空间、资源等, 不同树种种内、种间竞争剧烈^[26], 森林碳密度长期处于平稳甚至下降状态 (图 8)。由此可见, 川西地区森林植被固碳能力在 21 世纪中后期出现自然增长瓶颈, 需要提前开展人工措施介入促进森林碳储量的持续提升。

人工恢复 (如择伐和抚育) 可通过调整植被群落组成、种间密度及径级结构, 促进目标树种生长发育, 从

而提高森林生物多样性,完善植被多层次结构体系,提升森林固碳能力^[18, 26]。本研究预设对川西植被实施不同的人工恢复措施,有望明晰未来气候下该林区提升碳汇能力最佳管理方案。研究表明,当森林干扰相对较低时(0.01/10a),通过对云杉林进行经营管理(0.02/10a),冷杉林自然更新,川西地区森林生态系统的碳储量和碳密度最大(表 12)。该方案的参数设置是基于川西地区早期实施的森林恢复措施及云冷杉林生长特性。早期人工恢复措施以营造云杉人工纯林为主^[51],树种单一且密度过大^[52],林下土壤有机质及养分库退化严重,限制了树木的持续生长。加之造林后经营管理不当,叠加林火、病虫害干扰频发^[52],川西林区固碳能力将持续下降^[18](表 12)。因此,对云杉林进行幼苗幼树抚育,对种间密度不合理的地区抚育采伐和补植,调整种间密度,优化林分光照和水分条件,对云杉林生长、更新具有十分重要的作用,从而提高幼苗的存活率和碳汇能力^[53]。冷杉作为顶级群落,多为老龄林及天然次生林^[54],且对气候变化敏感^[55]。在气候暖干化趋势下,其生长和生存空间可能受到严重威胁^[56]。冷杉生长速率较缓,采伐后且林下自然植被更新短期内难以补偿碳损失。同时,冷杉对土壤肥力及含水量要求严苛,移植成活率相对较低,其碳储量难以在较短期内达到预期,甚至可能下降^[57]。因此,针对冷杉林实行封禁措施有助于优化森林生态系统结构和维护生态平衡^[58]。在此人工恢复方案下,恢复前期(2020—2030 年)森林碳储量与自然恢复时期差异较小,而恢复后期(2030—2070 年)逐渐高于自然恢复且呈现持续增加趋势(表 12 和图 8)。通过实施上述森林经营管理措施将有助于打破区域森林固碳能力的自然恢复瓶颈,促进未来气候下川西森林碳储量的持续增长。

综上所述,在未来开展亚高山地区森林恢复时,应结合双碳政策充分考虑气候变化下森林干扰和森林管理措施对当地森林碳汇能力的长期综合影响。针对区域森林结构体系,对原始天然林采取封禁措施,减少森林干扰对原有生境的破坏,优化森林生态系统结构和维护生态平衡。由于川西亚高山地区存在以云杉纯林为主的大面积低质次生林,通过对云杉林蓄积量、种间密度不合理的地区实施合理疏伐抚育及补植措施^[18],以形成均匀的林分结构,有助于植被向顶级群落更新演替,提升区域森林生态系统对未来气候的适应能力,突破自然恢复下森林固碳能力增长的限制瓶颈,促进区域森林碳汇能力的持续提升。

3.4 研究局限及展望

针对气候变化下评估森林干扰和森林管理措施对区域森林碳汇能力的长期综合影响这一难题,本研究基于森林景观生态模型充分刻画气候-植被-生态耦合过程及森林植被演替过程,模拟和预测了川西森林地上碳储量及碳密度现状及未来动态,提出了气候变化适应性森林经营管理措施。本研究从不同维度(植被类型、龄组、树种)探讨了植被碳储量及碳密度的时空变异机制,但考虑到景观生态模型运行效率,空间分辨率定为 500m。而川西地区海拔垂直梯度较大,横跨面积较广且气候、植被类型复杂多样,数据和模拟的空间分辨率仍有待提高。此外,由于 LANDIS PRO 模型的生物量估算模块主要针对地上生物量,因此,未来需要进一步结合土壤碳储量进行“地上地下”森林碳储量模拟预测。考虑到流域森林生态固碳效应与水文效应的交互影响,未来的研究不仅仅需要探索如何高效达成碳中和的目标,更应该从水资源供需角度出发,全面评估森林生态系统的固碳及水源涵养功能的协同与权衡关系,为区域林水资源适应性管理和森林恢复提供更系统的科学支持。

4 结论

本研究结合森林景观模型 LANDIS PRO 和森林生态系统碳-水动态模型 PnET-II 预测了未来气候情景下(2020—2070 年)自然恢复和人工恢复方案下川西地区森林地上碳储量动态,筛选出提升固碳能力的最佳森林管理措施。研究表明,自然恢复情景下研究区 2020 年地上碳储量较 2070 年提高了 67.23%。其中,以云杉、冷杉为主的成熟、过熟常绿针叶林是川西地区碳储量的主要贡献来源。相较于自然恢复,实施森林经营管理措施能够促进川西地区森林碳汇能力的提升。在多种森林干扰与经营管理措施组合方案中,当森林火灾干扰比例为 0.01/10a 且森林经营管理措施面积比例为 0.02/10a 时,川西地区森林生态系统的碳储量和碳密度最高,并呈持续增长趋势。因此,未来川西地区应在降低森林干扰的同时,通过合理保护原始天然林、疏伐抚

育及补植以云杉为主的低效人工纯林,有望突破森林碳汇自然增长瓶颈,促进区域森林质量及碳汇能力的持续增长。

参考文献(References):

- [1] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell & Environment*, 1999, 22(6): 715-740.
- [2] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin F S 3rd. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [3] 胡峻嶒, 黄访, 铁烈华, 刘雄, 魏圣钊, 黄从德. 四川省森林植被固碳经济价值动态. *生态学报*, 2019, 39(1): 158-163.
- [4] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 李海奎. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征. *生态学报*, 2021, 41(13): 5093-5105.
- [5] Zhang M F, Wei X H, Sun P S, Liu S R. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: the case study in the Upper Minjiang River of Yangtze River Basin. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 1-11.
- [6] Li X Y, Li Y, Chen A P, Gao M D, Slette I J, Piao S L. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270: 239-248.
- [7] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 崔冉冉, 李鹏, 唐颖. 2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 155-163.
- [8] 吴伟, 杨飞龄, 王军军, 刁奕欣, 郭洋, 武瑞东. 基于 MODIS 时序数据的中国西南地区主要植被生态系统干扰动态监测及分析. *地理研究*, 2021, 40(5): 1478-1494.
- [9] 何英. 森林固碳估算方法综述. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 22-27.
- [10] 刘迎春, 高显连, 付超, 于贵瑞, 刘兆英. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力. *生态学报*, 2019, 39(11): 4002-4010.
- [11] 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述. *生态学报*, 2015, 35(13): 4241-4256.
- [12] 张鹏, 冯兆东, 王俊人. 森林生物量研究方法综述. *能源与节能*, 2014(6): 102-104.
- [13] Zolkos S G, Goetz S J, Dubayah R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 289-298.
- [14] 高述超, 陈毅青, 陈宗铸, 雷金睿, 吴庭天. 海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征. *生态学报*, 2023, 43(9): 3558-3570.
- [15] 李潇, 吴克宁, 冯喆, 王颖涵. 基于固碳服务供需视角的河南省碳平衡研究. *生态学报*, 2022, 42(23): 9627-9635.
- [16] 何东进, 游巍斌, 洪伟, 巫丽芸, 詹仕华, 游惠明. 近 10 年景观生态学模型研究进展. *西南林业大学学报*, 2012, 32(1): 96-104.
- [17] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 布仁仓, 贺红土, 冷文芳. 像元尺度上不确定性对空间景观直观模型模拟的影响. *生态学报*, 2004, 24(9): 1938-1949, 2094.
- [18] 刘世荣, 史作民, 马姜明, 赵常明, 张远东, 刘兴良. 长江上游退化天然林恢复重建的生态对策. *林业科学*, 2009, 45(2): 120-124.
- [19] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 张国庆. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征. *生态学报*, 2009, 29(9): 5115-5121.
- [20] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 陈林武. 长江上游森林植被水文功能研究. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 451-456.
- [21] 汤旭, 宋璇, 曾玉林, 张大红. 长江经济带森林生态安全评价及时空演变研究. *生态学报*, 2021, 41(5): 1693-1704.
- [22] Zhang M F, Wei X H. Deforestation, forestation, and water supply. *Science*, 2021, 371(6533): 990-991.
- [23] 冯秋红, 刘兴良, 卢昌泰, 吴晓龙, 潘红丽, 马文宝, 刘世荣. 不同经营模式对川西亚高山天然次生林林地水文效应的影响. *生态学报*, 2016, 36(17): 5432-5439.
- [24] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Gao Y, Xie S, Mi J. GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [25] 陈焕镛, 黄成就. *中国植物志*. 北京: 中国科学出版社, 1998.
- [26] 师嘉祺, 余恩旭, 徐亚莉, 张明芳. 气候变化下西南亚高山森林景观恢复效果模拟预测——以岷江杂谷脑河上游流域为例. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(3): 716-724.
- [27] 高宝蕊, 孔宪需, 方文培, 许介眉, 管中天, 杨俊良, 熊济华, 易同培, 伍煜庭, 谭仲明. *四川植物志*. 成都: 中国科学院成都生物研究所, 2001.
- [28] 四川植被协作组. *四川植被*. 成都: 四川人民出版社, 1980.
- [29] 余恩旭. 基于多源遥感数据的西南地区森林干扰识别与评价[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [30] 陈起忠, 李承彪, 王少昌. 四川省主要森林建群种生长规律的初步研究. *林业科学*, 1984, 20(3): 242-251.
- [31] Luo Y J, Wang X K, Ouyang Z Y, Lu F, Feng L G, Tao J. A review of biomass equations for China's tree species. *Earth System Science Data*,

- 2020, 12(1): 21-40.
- [32] 王玲. 川西北地区主要灌丛类型生物量及其模型的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [33] 刘兴良, 郝晓东, 杨冬生, 刘世荣, 宿以明, 蔡小虎, 何飞, 马钦彦. 卧龙巴郎山川滇高山栎灌丛地上生物量及其模型. 生态学杂志, 2006, 25(5): 487-491.
- [34] 陈国鹏, 杨克彤, 张金武, 王立, 曹秀文, 刘锦乾. 甘肃南部 7 种高寒杜鹃生物量模拟. 生态学报, 2021, 41(13): 5377-5384.
- [35] 张卓文. 柳杉生长过程分析及生长阶段划分. 中南林学院学报, 2003, 23(2): 46-51.
- [36] 伍小敏, 徐春, 杨汉波, 陈彖, 郭洪英, 黄振, 王泽亮. 四川桧木天然林和人工林的单木生长模型研究. 四川林业科技, 2018, 39(4): 8-11, 44.
- [37] Mladenoff D J, Host G E, Boeder J, Crow T R. LANDIS: a spatial model of forest landscape disturbance, succession, and management. GIS and environmental modeling: progress and research issues. GIS World Books, Fort Collins, Colo, 1996:175-180.
- [38] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵. 四川森林植被碳储量的时空变化. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2687-2692.
- [39] Xu C G, Gertner G Z, Scheller R M. Uncertainties in the response of a forest landscape to global climatic change. Global Change Biology, 2009, 15(1): 116-131.
- [40] 罗旭, 梁宇, 贺红士, 黄超, 张庆龙. 气候变化和不同强度造林对大兴安岭主要树种林分信息和地上生物量的长期影响. 生态学报, 2019, 39(20): 7656-7669.
- [41] Luo X, He H S, Liang Y, Wu Z W. Evaluating simulated effects of succession, fire, and harvest for LANDIS PRO forest landscape model. Ecological Modelling, 2015, 297: 1-10.
- [42] Luo X, He H S, Liang Y, Wang W J, Wu Z W, Fraser J S. Spatial simulation of the effect of fire and harvest on aboveground tree biomass in boreal forests of Northeast China. Landscape Ecology, 2014, 29(7): 1187-1200.
- [43] 陈定超, 李卫朋, 蔡晓雨, 敬楠, 王瑞芳, 唐梦滴, 高艺琳. 四川省森林资源动态变化及其影响因素分析. 地球环境学报, 2021, 12(4): 425-435.
- [44] 王金锡, 许金铎. 川西高山林区森林更新技术研究. 林业科学, 1989, 25(6): 570-574.
- [45] Chen J D, Gao M, Cheng S L, Hou W X, Song M L, Liu X, Liu Y, Shan Y L. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997—2017. Scientific Data, 2020, 7(1): 391.
- [46] 邵波, 燕腾. 四川省森林植被碳储量及碳密度估算. 西南林业大学学报: 自然科学, 2017, 37(2): 179-183.
- [47] 方精云. 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算. 植物生态学报, 2000, 24(5): 635-638.
- [48] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Reply to: on the role of atmospheric model transport uncertainty in estimating the Chinese land carbon sink. Nature, 2022, 603(7901): E15-E16.
- [49] Wang W J, He H S, Spetich M A, Shifley S R, Thompson F R III, Larsen D R, Fraser J S, Yang J. A large-scale forest landscape model incorporating multi-scale processes and utilizing forest inventory data. Ecosphere, 2013, 4(9): 1-22.
- [50] 戴铭, 周涛, 杨玲玲, 贾根锁. 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(1): 172-184.
- [51] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 林波, 吴彦, 何海, 包维楷. 川西亚高山人工云杉林地有机物和养分库的退化与调控. 土壤学报, 2004, 41(1): 126-133.
- [52] Yang J D, Zhang Z M, Dawazhaxi, Wang B, Li Q, Yu Q C, Ou X K, Ali K. Spatial distribution patterns and intra-specific competition of pine (*Pinus yunnanensis*) in abandoned farmland under the Sloping Land Conservation Program. Ecological Engineering, 2019, 135: 17-27.
- [53] 幸福, 包维楷, 庞学勇, 闫晓丽, 刘鑫. 云杉人工纯林中树木个体径向生长过程及林窗疏伐后的释放效应. 应用与环境生物学报, 2013, 19(2): 262-271.
- [54] 杨玉坡, 钱国禧, 叶兆庆. 西南高山地区冷杉、云杉林冠下天然更新的初步观察. 林业科学, 1956, 2(4): 55-72.
- [55] 赵志江. 川西亚高山岷江冷杉与紫果云杉对气候的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [56] 彭钟通, 郭明明, 张远东, 顾峰雪, 邵辉, 刘世荣. 升温突变对川西道孚林线川西云杉和鳞皮冷杉生长的影响. 生态学报, 2021, 41(20): 8202-8211.
- [57] 鲜骏仁, 张远彬, 王开运, 胡庭兴, 杨华. 川西亚高山 5 种森林生态系统的碳格局. 植物生态学报, 2009, 33(2): 283-290.
- [58] 陈林武, 刘兴良, 牟克华, 宿以明. 川西米亚罗天然林保护区封山育林效果研究. 四川林业科技, 2002, 23(1): 7-14.