



中国水土保持学会
中国土壤学会
中国水利学会

水土保持通报

Bulletin of Soil and Water Conservation

ISSN 1000-288X, CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：2000—2030年多级流域尺度下重庆市林地景观格局碳储量变化
作者：朱诗柔，牟风云，黄淇，沈祺林
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240611.002
收稿日期：2023-11-14
网络首发日期：2024-06-13
引用格式：朱诗柔，牟风云，黄淇，沈祺林. 2000—2030年多级流域尺度下重庆市林地景观格局碳储量变化[J/OL]. 水土保持通报.
<https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240611.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

2000—2030年多级流域尺度下重庆市 林地景观格局碳储量变化

朱诗柔, 牟凤云, 黄淇, 沈祺林

(重庆交通大学 智慧城市学院, 重庆 402260)

摘要: [目的] 分析多级流域林地变化对碳储量变化的影响, 预测未来多级流域碳储量变化趋势, 为从流域角度的地区林地可持续发展以及碳中和政策实施提供一定的科学依据。[方法] 以重庆市为研究区, 运用 PLUS 模型、景观格局指数、生物量扩展因子法、灰色关联度等方法, 分析 2000—2030 年多级流域尺度下重庆市林地与碳储量的时空动态变化, 探究了自然情景发展下林地格局变化与碳储量的关联度。[结果] ① 2000—2020 年, 林地面积增加 3 404.55 km², 主要来自耕地转换; 一级流域林地景观格局总体趋向于聚集化与规则化, 破碎程度相对减少; 二级流域内“区与群”的林地格局变化历史规律与未来趋势方面存在差异; ② 前 20 年, 林地碳储量呈现增加—减少趋势, 总碳储量增加, 其中一级流域洞庭湖水系碳储量增加最多, 而二级流域碳储量增量高值区域由北向南移动; ③ 预测 2030 年, 总碳储量增加, 且与不规则指数具有较强关联度。[结论] 不同流域尺度下, 不同林地景观格局指数与碳储量的相关性存在差异, 未来可以从流域角度出发制定有效措施, 提高碳汇效益实现碳中和目标。

关键词: PLUS 模型; 生物量扩展因子法; 碳储量; 多级流域; 景观格局动态变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0000-00

中图分类号: S757.4

文献参数: 朱诗柔, 牟凤云, 黄淇, 等. 2000—2030 年多级流域尺度下重庆市林地景观格局碳储量变化 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): -. Zhu Shirou, Mou Fengyun, Huang Qi, et al. Change of forest landscape carbon storage pattern in Chongqing City under different multi-level watershed scales during 2000—2030 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): -.

Change of Forest Landscape Carbon Storage Pattern in Chongqing City Under Different Multi-level Watershed Scales During 2000—2030

Zhu Shirou, Mou Fengyun, Huang Qi, Shen Qilin

(School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 402260, China)

Abstract: [Objective] The influence of multi-level watershed forest changes on carbon stock changes were analyzed and the future trend of multi-level watershed carbon stock changes were predicted in order to provide a scientific basis for the sustainable development of regional forest land and the implementation of carbon neutral policy at the watershed scale. [Methods] The study was conducted for Chongqing City. We analyzed the spatiotemporal dynamic changes in forest land and carbon storage from 2000 to 2030 at the multi-level watershed scale by use of the PLUS model, landscape pattern indices, biomass expansion factor method, and gray correlation degree. Additionally, we determined the correlation between forest land pattern changes and carbon storage under natural development scenarios. [Results] ① Between 2000 and 2020, forest area increased by 3 404.55 km², primarily due to the conversion of cultivated land. The forest landscape pattern in the first-level watershed showed a tendency towards clustering and regularity, with a relatively reduced degree of fragmentation. There were distinct differences in the historical patterns and future trends of forest landscape pattern changes in the second-level watershed's “district and group”. ② In the initial two decades, the carbon storage of forest land exhibited an increasing-decreasing trend, resulting

收稿日期: 2023-11-14

修回日期: 2024-01-30

资助项目: 重庆市教委科学技术研究计划项目“居民出行视角下山地城市公路—轨道交通网络智慧协同抗洪涝灾害韧性优化方法研究” (KJZD-K202300707); 重庆交通大学研究生科研创新项目 (2023S0130, 2024S0158)

第一作者: 朱诗柔 (2000—), 女 (汉族), 四川省眉山市人, 硕士研究生, 研究方向为国土资源遥感、景观生态学。Email: 2446732332@qq.com。

通信作者: 牟凤云 (1979—), 女 (汉族), 山东省高密市人, 博士, 教授, 主要从事国土资源遥感、智慧城市公共安全。Email: mfysd@cqjtu.edu.cn。

in an overall increase. The Dongting Lake system in the first-level watershed experienced the highest increase in carbon storage, and the high-value area of carbon storage increment in the second-level watershed shifted from north to south. ③ Total carbon storage was predicted to increase by 2030, and the increase was strongly correlated with the irregular index. [Conclusion] The correlation between the forest landscape pattern index and carbon storage varied at different watershed scales. In the future, effective measures can be developed from a watershed perspective to improve carbon sink benefits and achieve carbon neutrality.

Keywords: PLUS model; biomass expansion factor method; carbon storage; multi-level watershed; dynamic change of landscape pattern

森林生态系统作为陆地上生态系统光合作用的主体,在维持全球碳循环中发挥着重要作用^[1]。研究表明,土地利用格局变化会对生态系统碳循环过程产生影响,进而影响全球碳平衡^[2]。为实现“双碳目标”推进生态保护,在二十大报告^[3]与《成渝地区双城经济圈碳达峰碳中和联合行动方案》^[4]中提出了相关政策与实施方案。在此基础上,研究林地碳储量变化可以反映区域碳汇的固碳能力情况,揭示森林景观格局动态变化与碳储量的关系,有助于针对性地合理采取生态保护措施与修复政策提高碳汇服务能力^[5],对实现碳中和、碳达峰等目标具有重要意义。

土地利用变化是引起生态格局与生态系统变化的重要因素。景观格局—动态—过程可以探索森林景观结构、功能及其变化,挖掘潜在的生态发展规律^[6],对于森林恢复、建设管理等有着重要作用。林地景观格局可以采用景观数量、数学建模、空间转移等^[7-8]方法进行定量分析。后来,土地利用模拟预测逐渐成为热点,常结合元胞自动机模型^[9]、马尔科夫模型^[10]、PLUS 模型^[11]等对城市群^[12]、流域^[13]、县级^[14]、自然保护区^[15]等多个尺度的林地景观格局进行了动态变化分析研究。近年来,随着全球气候变暖,低碳发展受到广泛关注。而森林在陆地碳汇中起着关键作用,已有研究尝试根据土地利用中林地变化探究影响碳储量因素、生态系统碳汇效益^[16]、生态服务功能^[17]、测算未来碳储量^[18]等方面的内容。总体来看,虽然已有研究取得了较多的成果,但仍然存在一定不足。受尺度效应影响,采用单一尺度视角难以全面揭示林地动态变化规律,也使得量化不同尺度下人类活动与生态系统的相互作用变得困难。因此如何破除尺度效应问题,深入探讨林地景观格局对碳储量变化的影响,成为一个难点。目前,多级尺度主要以行政尺度为主,然而河流分布对于森林生长有着重要作用,不仅为森林生态系统提供必要水源供给,同时为其提供了丰富的生物多样性,维持生态平衡。鉴于流域作为河流的基本单元,不同流域森林发展程度存在差异,流域尺度成为了研究林地的重要视角。因

此,本研究创新性地选择“一级流域”与“二级流域”两种尺度,对林地景观格局对碳储量影响进行深入分析,以克服单一尺度视角的不足,解决尺度效应问题,提高森林碳汇潜力。

重庆市作为典型的山地城市,林地分布形式多样,碳汇情况也不尽相同,而长江流经重庆市形成三峡库区,水系发达、河流纵横,由于不合理开发,重伐轻造,导致流域内森林植被锐减、水土流失严重,对重庆市开展流域尺度林地格局变化与碳汇效益研究,有助于土地合理开发利用,保护生态环境。本研究以重庆市为研究区,利用 PLUS 模型模拟自然发展情景下 2030 年重庆市土地利用变化情况,采用 Fragstats 软件对 2000—2030 年重庆市多级流域林地景观格局展开动态分析,使用生物量扩展因子法计算不同流域的碳储量,分析多级流域林地变化对碳储量变化的影响,预测未来多级流域碳储量变化趋势,以期为从流域角度的地区林地可持续发展以及碳中和政策实施提供一定的科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

重庆市位于(图 1)中国四川盆地东部,地跨东经 105°11′—110°11′,北纬 28°10′—32°13′,境内地形由南北向长江河谷逐级递减,斜贯有巫山、七曜山、大娄山等山脉,渝东北、渝东南分别盘踞有大巴山武陵山两座山脉,中部主要是以低山和丘陵相间排列的平行岭谷类型组合;境内水系密布,重庆市一级流域主要包括:岷江水系、嘉陵江水系、长江上渝干流域水系、乌江水系、洞庭湖水系;截至 2021 年底,全市林地 4.69×10⁶ hm²。作为巴渝大地上林地资源最丰富、林地景观最优美、生物多样性最富集、生态功能最完善的核心生态区域,重庆市国有林场经营总面积 3.83×10⁵ hm²,林地覆盖率 91%,活立木蓄积 3.11×10⁷ m³;国家级公益林 1.50×10⁵ hm²,地方公益林 1.55×10⁵ hm²,商品林 7.60×10⁴ hm²;依托国有林场建立的自然保护区共 31 个、林地公园 56 个。

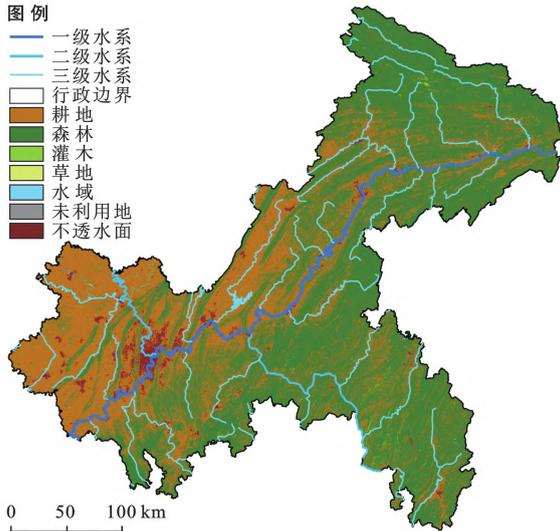


图 1 重庆市土地利用分布

Fig.1 Land use distribution map of Chongqing

1.2 数据来源与预处理

本研究试验数据包括土地利用数据,驱动因子数据(DEM数据、降雨量、温度、水系、土壤、道路、GDP、人口数据等),基础地图数据(流域分级、行政边界)见表1。为保证以上数据的统一性,试验所有数据统一采用 WGS_1984_UTM_Zone_48 N 投影坐标系,像元大小 30 m,统一行列号。其中不同分辨率影像图通过重采样至 30 m,坡度与坡向利用 DEM 数据通过 ArcGIS 软件获得;距离因子通过欧式距离获得;二级流域分布通过高程数据利用水文分析获得。

1.3 研究方法

通过 PLUS 模型模拟 2020—2030 年的土地利用情况与历史土地利用数据分析多级流域尺度下的林地景观格局动态变化,利用生物量扩展因子法、灰色关联度分析林地变化对碳储量变化的影响,并预测未来碳储量情况。

表 1 数据类型与来源
Table 1 Data types and sources

数据类型	名称	分辨率	格式	来源
土地利用数据	CLCD	30 m	栅格	Geo 地理数据研究所 ^[19]
	DEM 数据	30 m	栅格	资源环境科学与数据中心
	中国 GDP	1 km	栅格	赵乃卓教授团队公开发表数据集 ^[20]
	人口空间分布网格数据集	1 km	栅格	资源环境科学与数据中心
驱动因子	中国 1980 年以来逐年降雨量	1 km	栅格	资源环境科学与数据中心
	逐年平均气温空间差值数据集	1 km	栅格	资源环境科学与数据中心
	中国土壤数据集(v1.2)	1 km	栅格	国家青藏高原科学数据中心
	河网、道路、铁路		矢量	OpenStreetMap
	中国一级、二级流域分级数据集	1 : 25 万	矢量	国家地球系统科学数据中心
基础地图数据	重庆行政边界数据		矢量	资源环境科学与数据中心

1.3.1 未来土地利用模拟 PLUS 模型具有挖掘土地利用变化的原因和模拟斑块级别的土地利用变化的优点^[11],特别是林地、草地等自然用地类型^[21]。该模型将两期土地利用数据进行叠加,得到土地类型状态发生变化的单元格,并与输入的各项驱动因子,采用随机森林分类算法得到各地类的发展潜力,通过挖掘驱动因子与土地利用之间的关系,预测未来地类需求从而得到模拟结果。本研究根据相关文献与研究区实际情况,从社会因素、自然因素等方面选择 11 个指标因子作为驱动因素^[22-23],以 2020 年土地利用数据为起始数据,模拟重庆市 2030 年在自然发展状况下土地利用变化情况。

1.3.2 景观格局指数 景观格局是指在空间上由形状、大小、功能各不相同的斑块镶嵌形成,是生态过程不同尺度上相互作用的结果^[24]。通过 Fragstats4.2 软件计算每一个流域的林地景观格局指数,分析不同

流域下的林地景观格局动态变化情况。结合已有研究的指标选取情况^[22,15],本研究选择景观格局指数包括斑块密度(PD)、斑块所占景观面积比例(PLAND)、景观形状指数(LSI)、聚集度(AI)。斑块密度反映景观的优势度,与平均斑块面积结合反映景观的破碎化程度;斑块所占景观面积比例表示林地的规模;景观形状指数反映林地的不规则度;聚集度反映同类景观斑块共边特征。

1.3.3 碳储量估算 已有研究常采用 InVEST 模型对区域内的碳储量进行测算,具有输入数据量少、操作简单等优点,但该模型忽略了相同土地利用类型各自碳库自身碳密度在空间距离变大时的地域差异,因此本研究采用生物量扩展因子法(IPCC)^[25]计算林地碳储量变化情况,通过计算出生物量,然后用生物量乘以含碳率得到碳储量,具体如公式(1):

$$C_{林} = V \times \overline{BEF} \times \overline{D} \times (1 + \overline{R}) \times \overline{CF} \quad (1)$$

式中: $C_{林}$ 表示林地的碳储量; V 表示研究区林地的蓄积量(m^3); \overline{BEF} 表示平均生物量扩展因子; \overline{D} 表示平均木材基本密度(t/m^3); \overline{R} 表示平均树种的根茎比; \overline{CF} 表示平均树种的含碳率。重庆市林业局数据显示,2022 年底全市林地蓄积量为 $2.50 \times 10^8 m^3$ 。参考相关文献并结合实际情况综合考虑^[25],相关树种的生物量扩展因子、木材基本密度、根茎比、含碳率等参数见表 2。

表 2 重庆市各树种生物量扩展因子、木材基本密度、根茎比、含碳率

Table 2 Biomass expansion factor, wood basic density, root to stem ratio and carbon content of various tree species in Chongqing City

树种	BEF	$D/(t \cdot m^{-3})$	R	CF
马尾松	1.817 3	0.448 2	0.186 6	0.527 1
杉木	1.926 5	0.307 1	0.234 1	0.512 7
柳杉	1.846 9	0.289 3	0.224 7	0.533 1
柏木	2.119 8	0.472 2	0.213 8	0.508 8
栎类	1.703 8	0.611 9	0.263 1	0.479 8
其他硬阔类	1.927 8	0.606 2	0.217 8	0.482 2
其他软阔类	1.871 7	0.422 2	0.220 1	0.461 1
针叶混	2.026 3	0.390 2	0.208 6	0.522 6
阔叶混	1.876 0	0.522 2	0.235 1	0.479 8
针阔混	1.864 1	0.475 4	0.221 8	0.515 3
平均值	1.898 0	0.454 49	0.222 57	0.502 22

1.3.4 灰色关联度分析 灰色关联分析主要目的是量化各因素之间的关联程度,并表征各因素间发展趋势的相似或相异程度。假设参考数列与比较数列为: $Y = Y(k) | k = 1, 2, \dots, n$; $X_i = X_i(k) | k = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m$ ^[26]。公式为:

$$\delta \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \tau_{ij}(t) \quad (2)$$

$$\tau_i(t) = \frac{\Delta_{\min} + R \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + R \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: δ 为关联度; $\tau_i(t)$ 为关联系数, R 介于 0~1, 一般取 0.5; $\Delta_i(t) = |Y(t) - X_i(t)|$; $\Delta_{\max} = \max_k \max_i \Delta_i(t)$; $\Delta_{\min} = \min_k \min_i \Delta_i(t)$ 。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年土地利用变化

2000, 2010, 2020 年重庆市林地面积分别为 41 286.90, 43 633.66, 44 691.45 km^2 ; 2000—2010, 2010—2020 年林地转入情况分别为 4 904.81, 4 346.34 km^2 ; 转出情况分别为 2 558.04, 3 288.56 km^2 , 由图 2 可知, 重庆市从 2000—2020 年的林地面积总体上以先快后慢的速度增加, 林地面积增加主要来源于耕地和草地转换, 转出主要流向耕地、草地、水域、建设用地。其

中 2000—2010 年, 由于 2003 年退耕还林政策的实施, 林地转入的面积远大于林地转为其他用地类型面积; 2010—2020 年, 由于城市经济快速发展, 城镇化建设加快, 耕地占用, 林地需要复耕用于农业生产需求, 因此重庆市林地总面积增加变缓。

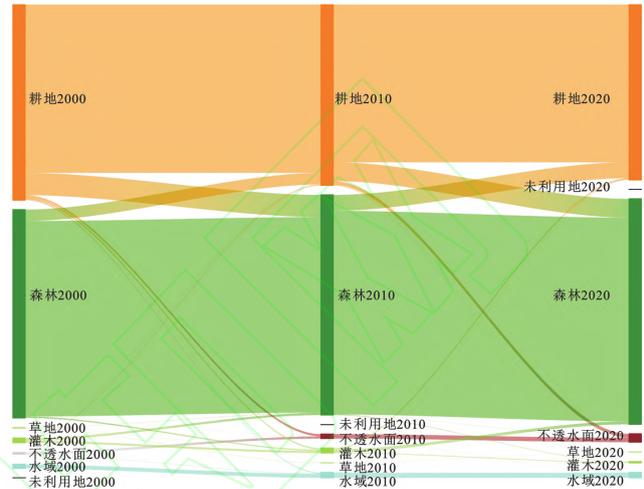


图 2 2000—2020 年重庆市土地利用转移情况

Fig.2 Land use transfer in Chongqing from 2000 to 2020

2.2 2000—2020 年林地景观格局动态变化

2.2.1 一级流域景观格局动态变化 由图 3 可知: 2000—2020 年, 林地规模与聚集度总体均呈现上升趋势, 林地规模均值由 45.278 增加至 47.678, 聚集度均值由 87.878 增加到 89.672, 说明流域林地趋向于聚集化, 林地面积增加。破碎度与不规则度总体均呈现下降趋势, 其中破碎度均值由 2.962 减少到 1.851, 不规则度均值由 214.852 减少到 183.296, 说明 2000—2020 年重庆市一级流域林地景观逐渐趋向于规则化, 破碎程度相对减小。2000—2010 年, 在退耕还林的政策下, 大量耕地转换为林地, 致使林地聚集度上升。洞庭湖水系变化最显著, 由于渝东南武陵山城市群大量耕地转为林地, 使得洞庭湖水系林地面积增加。

2.2.2 二级流域林地景观格局动态变化 由图 4 可知, 2000—2020 年, 二级流域林地规模与聚集度总体呈现减小—增加趋势, 平均值从 72.70, 86.44 减小为 45.84, 72.66, 由于城市扩张、工业发展与基础设施建设等, 林地转为建设用地, 而在这期间又施行退耕还林政策, 使得一级流域林地规模增加缓慢, 导致林地斑块空间分布存在差异, 聚集程度不高; 林地破碎度指数均值呈现“减小—增加”趋势, 从 13.99 增加到 22.47; 不规则指数平均值均呈现“增加—减小”趋势, 从 7.42 变化到 7.31, 表明无规则的退耕还林, 破碎化增加, 斑块边缘复杂化。

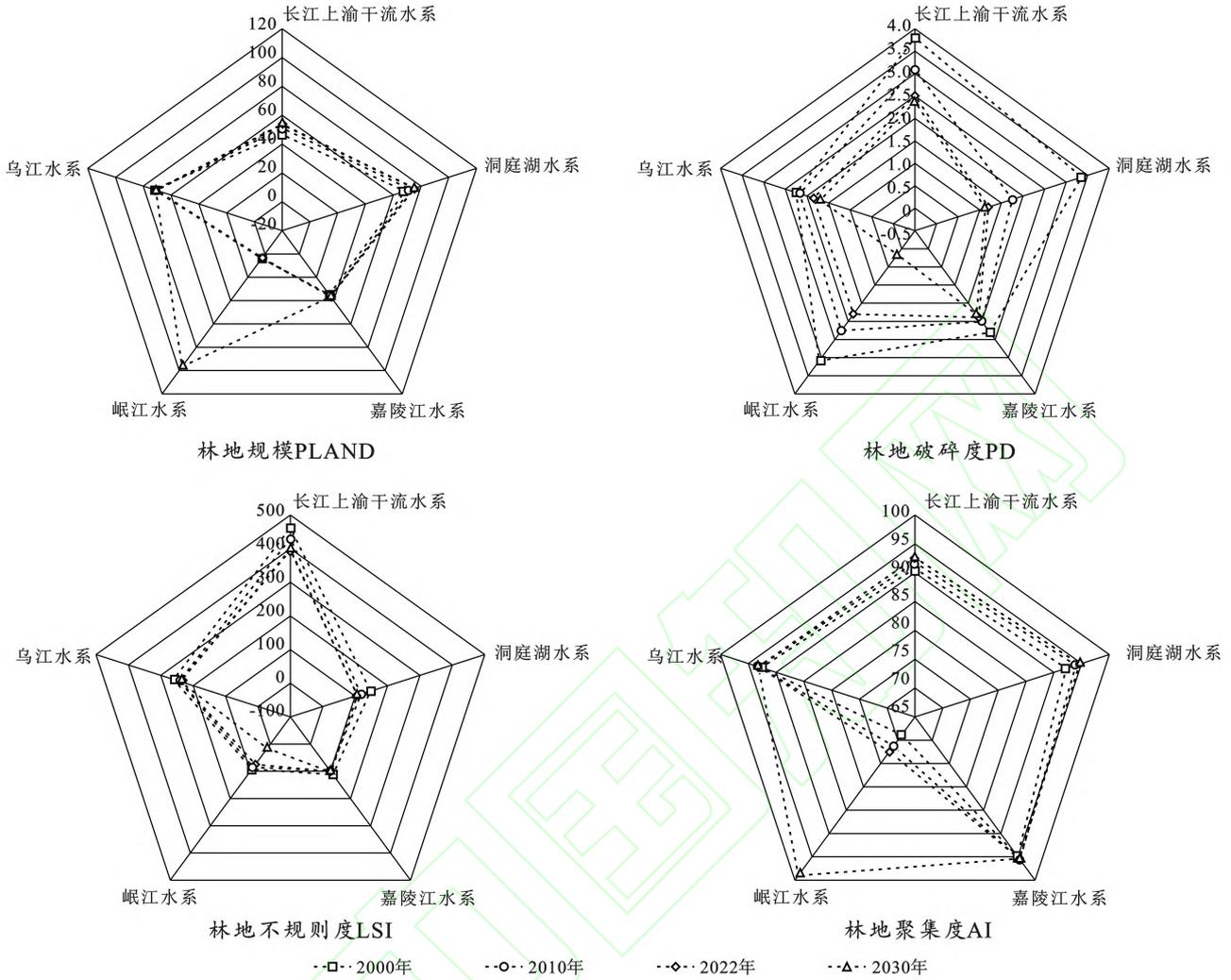


图 3 重庆市一级流域景观指数雷达图

Fig.3 Radar map of landscape index of first-level watershed in Chongqing City

从空间分布来看(图 5),2000—2010 年,林地规模指数、破碎度指数、不规则度指数高值区域集中于西北部与东南部的乌江水系、洞庭湖水系、嘉陵江水系,聚集度指数高值集中于东北部与中部的长江上渝干流水系。2010—2020 年,林地规模指数高值区域集中于长江以北小江以南,破碎度指数高值区域集中于长江以南,小江以北;不规则度指数高值区集中于岷江水系以及渝北嘉陵江水系;聚集度指数高值区集中于长江上渝干流水系与西北部。一二级流域总体变化存在空间差异性,原因有以下几点:①尺度效应,不同流域的林地格局空间分布具体化,林地斑块面积变化在小尺度角度下体现更加具体与细致。②2000—2020年随着城市不断扩张,耕地被大量占用,适宜耕作的林地被转换为耕地,同时退耕还林以及林地保护等政策的实施,其林地总体上的破碎程度有所减缓。距离较远的山区,道路复杂,人为因素较少,适合林地生长,趋向于规则化、集聚化。通过分析

发现,长江上渝干流水系林地规模指数与破碎度指数也增加,由于城镇化进程加快,重庆主城与三峡库区城市群城市不断扩张,土地利用发生显著变化,林地格局破碎化。

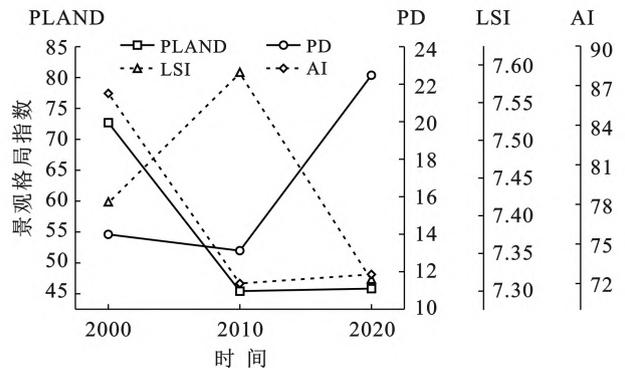


图 4 2000—2020 年重庆市二级流域林地景观格局指数平均值
Fig.4 The average value of woodland landscape pattern index in secondary catchment in Chongqing City from 2000 to 2020

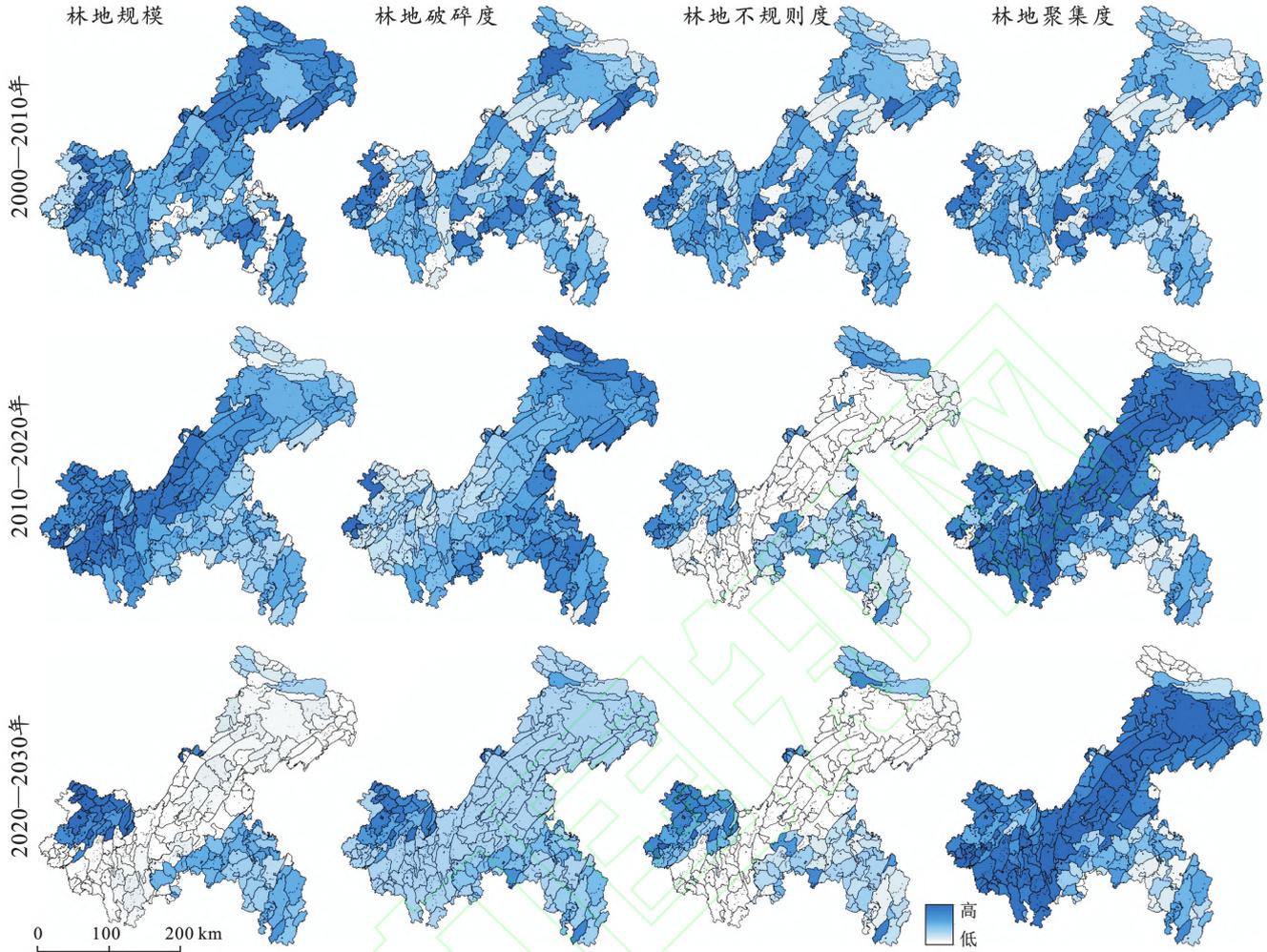


图 5 2000—2030 年重庆市二级流域林地景观格局变化空间分布

Fig.5 Spatial distribution of forest landscape pattern change in secondary watershed in Chongqing City from 2000 to 2030

2.3 2000—2020 年林地碳储量变化与分布

2.3.1 时间特征 由表 3 可知,2000—2020 年,重庆市一级流域的林地碳储量变化总体以“增加—减小—增加”变化趋势,2000—2010 年共增加 27 098.46 t,说明 2003 年以来退耕还林政策有效实施取得了有效成果,促进林地碳储量变化增加;2010—2020 年共增加 1 385.31 t,这 10 年增量减少,主要是由于城市不断扩张,大量地类转为建设用地,从而林地面积减少,碳储量降低。

表 3 2000—2030 年重庆市一级流域碳储量增量
Table 3 Increment of primary basin carbon storage in Chongqing City from 2000 to 2020 t

流域	2000—2010 年	2010—2020 年
长江上渝干流水系	7 836.176	1 130.290
洞庭湖水系	9 647.374	118.834
嘉陵江水系	3 804.667	3.616
岷江水系	17.847	13.538
乌江水系	5 792.400 0	119.029 3

从二级流域来看,林地碳储量呈现“减小—增加—增加”趋势,2000—2010 年平均减小 0.42 t,由于退耕还林政策实施,林地总面积增加,但无规则增加模式使得林地碳储量减小;2010—2020 年平均减小 0.15 t,表明不同尺度的碳汇固碳能力存在差异。如永川区(临江河)、清江河、双龙河等流域,碳储量呈现“减小—增加—减小”的变化趋势,主要是由于小流域在该时期新增面积远大于其他时期。

2.3.2 空间特征 由图 6(a—b,d—e)可知,从一级流域视角出发,2000—2010 年,碳储量增量高值区主要集中于洞庭湖水系,2010—2020 年高值区集中于长江上渝干流水系,二级流域,发现 20 a 碳储量空间分布存在一定差异。2000—2010 年碳储量增量高值区主要集中于西北部渠江、东北部团滩河、西南綦江以;2010—2020 年碳储量增量高值区主要集中于中部(油江河、黎香溪、五部河)、西北部窟窿河、东北部东溪河等区域,这与已有研究结论一致^[27],由于主城区与渝东北三峡库区城市建设,人口密度增加,经济

发展不均衡,以及林地转换为建设用地与部分农业用地有关。

2.4 2020—2030 年重庆市自然发展情景下林地景观格局变化与碳储量变化

2020—2030 年(图 3),一级流域林地规模与聚集度整体上呈现增加趋势,破碎度与不规则度整体上呈现下降趋势,说明 2020—2030 年重庆市一级流域林地总体格局与历史规律一致,趋向于规则化、聚集化。其中长江上渝干流水系与嘉陵江水系与总体变化趋势不同,呈现相反变化趋势,林地景观格局趋向于破

碎化、复杂化。原因是随着经济快速发展,在该流域中的主城区与渝东北三峡库区的城镇化进程加快,林地景观格局发生变化。

二级流域(图 5)平均景观格局指数均增加,其中林地破碎度指数增加最多,由于岷江流域与嘉陵江流域城市建设,破坏林地的空间分布,使得林地斑块数量变多,破碎程度增加。从空间分布来看,林地规模、破碎度、不规则度指数高值区集中于西北与东南地区,聚集度指数高值区集中于长江上渝干流水系与西北部。

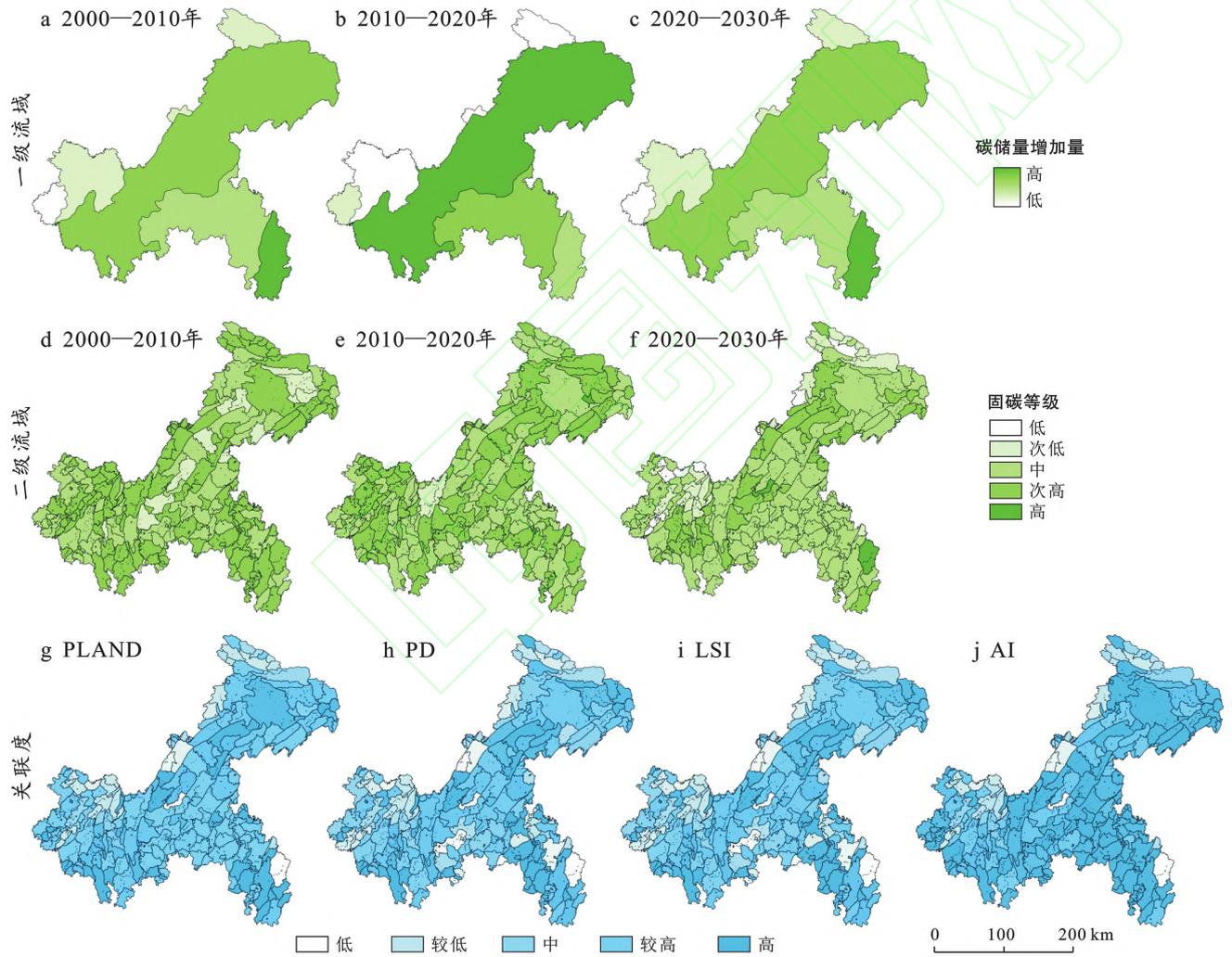


图 6 2000—2030 年重庆市一、二级流域碳储量增量空间分布和二级流域景观格局指数与碳储量增量关联度空间分布

Fig.6 The spatial distribution of carbon storage increment in primary and secondary basins and the spatial distribution of correlation degree between landscape pattern index and carbon storage increment in secondary basins in Chongqing City from 2000 to 2030

2020—2030 年在自然发展状态下[图 6(d,e—f)],一级流域林地碳储量共增加 76 860.77 t,其中长江上渝干流水系增加 22 657.331 t,洞庭湖水系增加 25 146.831 t,嘉陵江水系增加 12 606.480 t,岷江水系增加 31.653 t,乌江水系增加 16 418.480 t;二级流域平均增加 0.24 t 说明林地建设能够减少水土流失提

高绿化能力,增加碳储量,提高碳汇能力。从空间分布开看,一级流域碳储量增量高值区集中于洞庭湖水系,岷江水系碳储量增量相对较弱,变化趋于稳定,由于该流域适合种植林地趋于饱和,增加面积减少。二级流域碳储量增量高值区主要集中于江津区(一品河)、万州区(普里河)、洞庭湖水系(酉水)。

2.5 2020—2030 年重庆市林地景观格局指数与碳储量变化的关联度

林地变化对碳储量存在一定的影响,已有相关研究大多分析两者间的相关性,但本研究研究时段共 4 个年份,景观格局指数与碳储量变化之间的相关性并不合适,因此参考相关文献^[14,17],采用灰色关联度模型分析两者之间的关联性。

2.5.1 一级流域 由表 4 可知,各景观指数对一级流域碳储量增量影响大小排序依次是 LSI>PD>AI>PLAND,不规则程度指数平均值接近 0.90,说明一级流域中林地复杂程度对于碳储量变化具有较强的影响^[28]。其中,长江上渝干流水系的不规则度与碳储量增量的关联度高,其他关联度较低,说明林地复杂程度影响碳储量;洞庭湖水系的不规则指数、破碎度指数规模指数、聚集度指数与林地碳储量关联度均超过 0.90,其中不规则指数与碳储量增量相关度达到 0.99,说明洞庭湖水系的不规则度指数对碳储量变化具有较强的影响;嘉陵江水系的不规则度指数、林地规模指数与碳储量增量关联度超过 0.90,说明该流域的碳储量变化随着林地复杂程度与过规模增加而增加;岷江流域的破碎度指数、不规则指数与碳储量增量相关度均接近 1,说明该流域的这两种格局变化对于碳储量变化有较大影响;乌江水系的林地规模指数、不规则指数、破碎程度指数、聚集度指数与碳储量增量的关联度较强,其中不规则度指数的影响最大。

表 4 重庆市一、二级流域碳储量增量与景观指数灰色关联度
Table 4 Grey correlation degree between carbon storage in crement and landscape index in primary watershed in Chongqing City

流域尺度	流域	PLAND	PD	LSI	AI
一级流域	长江上渝干流水系	0.514	0.617	0.953	0.532
	洞庭湖水系	0.938	0.991	0.932	0.985
	嘉陵江水系	0.972	0.770	0.956	0.932
	岷江水系	0.660	0.992	1	0.735
	乌江水系	0.798	0.772	0.727	0.819
二级流域	长江上渝干流水系	0.974	0.952	0.976	0.975
	洞庭湖水系	0.983	0.982	0.982	0.983
	嘉陵江水系	0.983	0.977	0.977	0.983
	岷江水系	0.970	0.970	0.960	0.970
	乌江水系	0.994	0.987	0.987	0.995
	长江上渝干流水系	0.974	0.952	0.976	0.975

2.5.2 二级流域 由表 4 可知,二级流域中各景观格局指数对碳储量增量影响为:聚集度指数>林地规模>不规则度指数>破碎度指数,二级流域平均关联度均大于 0.95,说明林地景观空间分布、复杂程度均与碳储量变化存在较大的相关性,可见,林地碳储量增

量随着林地复杂程度增加而增加。与一级流域相比,二级流域平均关联度与一级流域不同且高于一级流域,表明尺度效应问题对林地生态系统在不同尺度上存在一定差异。从空间分布来看,不同二级流域景观格局指数对碳储量增量影响存在差异[图 6(g-j)],其中碳储量变化与林地规模、聚集度关联度高值集中于长江上渝干流水系以下区域(如龙溪河、皂角河、芭溪河等二级流域),低值区域集中于长江上渝干流水系以上部分(如酉水、龙溪河、青竹溪等二级流域);与不规则度、破碎度关联度高值区集中于长江上渝干流水系(如三坝溪、丁家河、大宁河、董河、笋溪河等二级流域),而关联度较低区域集中于洞庭湖北部(如白云溪、濂溪河、峰高河、阿莲江等二级流域),表明城市扩张、社会经济发展、城市功能结构变化影响林地景观格局变化,从而影响生态系统固碳能力。

3 讨论

3.1 多级流域碳储量变化

重庆市林地碳储量增量呈现先增后减的趋势,但总碳储量逐渐增加。林地碳汇效益与林地面积密切相关,2000—2010 年碳储量增加,意味着碳汇吸收能力增加,主要原因是退耕还林相关政策实施,林地面积增加,而 2010—2020 年,城市建设占用大量土地,人类活动的干扰增强,林地面积相对减少,因此碳汇效益下降,与已有研究相应年限结果较为相似^[21]。在林地景观格局中,总体不规则指数与碳储量有较强的关联度,说明林地的复杂程度越高碳汇效益越强^[14]。同时,一二级流域林地变化对于区域内的碳汇效益也不同,主要是尺度效应问题引起不同尺度下生态系统内的植被类型不同,碳汇效益不同;二级流域林地变化更容易受到局部土地利用变化的影响,而一级流域范围变大,可能受到更广泛的气候变化的影响,而土地利用变化的影响相对减小。因此,为实现“双碳”目标,在林地土地利用规划与景观设计时,优化林地分布,结合地形地貌,尽量避免零散的林地小斑块,提高林地内部复杂程度,使得各土地类型达到平衡,从而推动可持续发展,提高碳汇服务能力。

3.2 林地碳储量提高建议

土地利用变化会影响林地碳储量的变化。通过观察 2030 年自然发展情景下林地的变化趋势,林地规模增加和集聚化表明碳储量整体上有所增加。然而耕地减少与建设用地的增加,表明在退耕还林政策的推动下,林地得到了有效保护,但城市化过程,部分林地仍然受到影响。对于林地碳储量的变化,需要更加关注不同地类变化的影响,包括森林砍伐、转为其

他地类、森林再植和恢复都会使得碳储量发生变化。关于不同等级流域产生的不同响应,一方面尺度效应,在不同流域中植被类型的差异,涉及到区域内的影响因素也存在不同,导致植被结构与土地利用变化的影响不同,从而影响碳储量变化也不同。另一方面,树龄间接地影响不同流域的碳储量变化,不同等级流域下涉及不同树龄植被,不同树龄的碳汇固碳能力存在差异^[29]。因此,对于如何提高林地碳储量,需要考虑尺度效应问题,有助于制定更加具体、适宜的策略,以最大化地提高林地碳汇潜力。从多级流域视角出发,分析了“一级流域”与“二级流域”林地格局变化与碳储量的时空异质性,破除了尺度效应问题,为林地研究提供了新的视角。另外,建立林分生物量与储蓄量的换算关系有助于森林碳储量的准确估算。现有研究常采用生物量因子法^[30]与 InVEST 模型^[31]计算研究区碳储量,虽然 InVEST 模型具有输入量少计算方便的优点,但是相同地类各自碳库自身碳密度在空间距离变大时的地域差异,并且不同植被的年龄不同,碳汇能力也不同,因此本研究采用生物量扩展因子法,采用不同植被类型的平均值进行计算。但本研究仅对一级林地进行讨论与计算,未将灌木林、乔木林、竹林地等二级地类纳入分析,这些问题需要在未来研究中深入探讨。

4 结论

(1) 2000—2020年,由于退耕还林以及城市扩张的原因,重庆市林地面积呈现先快后慢的增加趋势,从41 286.90 km²增加到44 691.45 km²。尺度效应使得二级与一级林地格局变化存在差异,一级流域总体景观格局规则化、聚集化、破碎程度相对减少,而二级流域总体呈现“下降—增加”变化情况。林地碳储量增量先增加后减少,但总体碳储量提升,一级流域呈现先快后慢的增加趋势,而二级流域存在先减少后增加的变化情况;空间尺度上,渝东南武陵山、渝东北三峡库区城市群建设使得二级流域碳储量增量高值区域减少,向西北移动。

(2) 预测自然发展情景下,2030年林地面积为45 096.62 km²,2020—2030年不同尺度的林地景观格局两级分化严重,一级流域林地规模与聚集度增加,破碎度与不规则度下降,二级流域景观格局指数均增加;林地的碳汇效益增加。林地规模、不规则度、破碎度、聚集度指数与碳储量增量存在一定的关联,不同尺度下流域的景观指数变化对林地生态系统产生影响不同,导致不同等级流域林地碳汇效益存在差异。一级流域中林地不规则指数与林地碳储量增量

关联度最大,二级流域中不规则度指数、破碎度指数、聚集度指数、规模指数与碳储量均有较高关联度。未来重庆市林地治理可以从流域角度出发,制定有效的提高生态保护相关政策,优化国土空间保护与开发格局,提高林地生态系统的碳汇潜力。

参考文献 (References)

- [1] 苏永莉, 阎建忠, 周洪. 重庆市的森林转型: 时空格局与动态模拟[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 82-91.
Su Yongli, Yan Jianzhong, Zhou Hong. Forest transition in Chongqing: Temporal and spatial patterns and dynamic simulation [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2016, 38(6): 82-91.
- [2] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1214-1232.
Wang Tianfu, Gong Zhiwen, Deng Yuanjie. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi Province based on land use change [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1214-1232.
- [3] 习近平: 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告_滚动新闻_中国政府网[EB/OL]. [2024-01-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
Liu Xiaohui. Promote carbon peak carbon neutrality from the perspective of national sustainable development [N/OL]. China Mining News, 2023-10-16: 001.
- [4] 缪梦羽. 共建全国重要的清洁能源基地[N/OL]. 成都日报, 2022-02-25: 001. <https://doi.org/10.28063/n.cnki.ncdrb.2022.000715>.
Miao Mengyu. To build the important clean energy base of China [N/OL]. Chengdu daily, 2022-02-25: 001. <https://doi.org/10.28063/n.cnki.ncdrb.2022.000715>
- [5] 王想, 王春雨, 吕飞南, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的区县碳储量时空格局变化与碳汇提升策略: 以延庆区为例[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3373-3384.
Wang Xiang, Wang Chunyu, Lv Feinan, et al. Temporal and spatial carbon storage change and carbon sink improvement strategy of district and county level based on PLUS-InVEST model: Taking Yanqing District as an example [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3373-3384.
- [6] 李放, 邓华锋. 基于主成分分析的森林景观格局研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(3): 71-78.
Li Fang, Deng Huafeng. Research of forest landscape pattern based on principal component analysis [J]. Journal

- of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(3): 71-78.
- [7] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018 年海南岛湿地景观格局演变及其驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 59-70.
- Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Chen Yiqing, et al. Landscape pattern changes and driving factors analysis of wetland in Hainan Island during 1990—2018 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(1): 59-70.
- [8] 徐焯, 杨帆, 颜昌宙. 基于景观格局分析的雄安新区城市湿地生态健康评价[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7132-7142.
- Xu Ye, Yang Fan, Yan Changzhou. Ecological health assessment of urban wetland in Xiong'an based on landscape pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7132-7142.
- [9] 刘敬杰, 夏敏, 刘友兆, 等. 基于多智能体与 CA 结合模型分析的农村土地利用变化驱动机制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 242-252.
- Liu Jingjie, Xia Min, Liu Youzhao, et al. Driving mechanism of rural land use change based on multi-agent system and cellular automata [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 242-252.
- [10] 马银, 郑敏睿, 郑新奇, 等. 基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析: 以京津冀城市群为例[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6785-6797.
- Ma Yin, Zheng Minrui, Zheng Xinqi, et al. Prediction and spatiotemporal evolution analysis of green infrastructure based on CA-Markov and MSPA: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6785-6797.
- [11] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [12] 熊畅, 吴卓, 曾梓瑶, 等. 基于“空间形态—破碎化—聚集度”的粤港澳大湾区森林景观格局时空演变[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3032-3044.
- Xiong Chang, Wu Zhuo, Zeng Ziyao, et al. Spatiotemporal evolution of forest landscape pattern in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on “Spatial Morphology-Fragmentation-Aggregation” [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(8): 3032-3044.
- [13] 马国强, 李秋洁, 张蓉, 等. 抚仙湖流域景观格局及生态系统服务价值的动态变化[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 265-272.
- Ma Guoqiang, Li Qiujie, Zhang Rong, et al. Dynamic changes of landscape pattern and ecosystem service value in the Fuxian Lake basin [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2): 265-272.
- [14] 莫金宵, 雷冬梅, 李杰, 等. 县级自然保护区土地利用景观格局与固碳功能关系分析: 以云南省梁王山为例[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(4): 694-703.
- Mo Jinxiao, Lei Dongmei, Li Jie, et al. Analysis on the relationship between land use landscape pattern and carbon sequestration function in county-level nature reserve: A case study of Liangwang mountain, Yunnan Province [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2023, 38(4): 694-703.
- [15] 唐源远, 沈守云, 陆禹, 等. 长株潭生态绿心林地景观格局动态变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(12): 77-86.
- Tang Yuanyuan, Shen Shouyun, Lu Yu, et al. Dynamic changes in forest land landscape pattern of the Changsha Zhuzhou-Xiangtan ecological green heart [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(12): 77-86.
- [16] 李海萍, 李定恒, 李豪. 贵州省退耕还林还草潜在碳汇效益评估[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9499-9510.
- Li Haiping, Li Dingheng, Li Hao. Evaluation of potential carbon sink benefits of Grain for Green Project in Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9499-9510.
- [17] 马晓帆, 张海峰. 湟水河流域景观格局变化对生态系统服务价值的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(5): 626-633.
- Ma Xiaofan, Zhang Haifeng. Impact of landscape pattern change on ecosystem service value in Huangshui River Basin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(5): 626-633.
- [18] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9456-9469.
- Shao Zhuang, Chen Ran, Zhao Jing, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [19] 毛永发, 周启刚, 王陶, 等. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(5): 1042-1057.
- Mao Yongfa, Zhou Qigang, Wang Tao, et al. Spatial-temporal Variation of Carbon Storage and Its Quantitative Attribution in the Three Gorges Reservoir Area Coupled With PLUS-InVEST Geodector model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(5): 1042-1057.
- [20] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset

- and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [21] Zhao Naizhuo, Liu Ying, Cao Guofeng, et al. Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2017,54(3):407-425.
- [22] 黄淇, 牟凤云, 张用川, 等. 基于 ANN-CA 模型的重庆市多级流域耕地景观格局演化及预测[J]. *水土保持研究*, 2023,30(1):379-387.
- Huang Qi, Mou Fengyun, Zhang Yongchuan, et al. Evolution and Prediction of Cultivated Land Landscape Pattern in Multi-level Watershed of Chongqing Based on ANN-CA model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):379-387.
- [23] Wu Wenhao, Xu Linyu, Zheng Hanzhong, et al. How much carbon storage will the ecological space leave in a rapid urbanization area? Scenario analysis from Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023,189:106774.
- [24] 孙云霞, 刘兆刚, 董灵波. 帽儿山地区 1983—2016 年森林景观空间点格局及其关联动态性[J]. *应用生态学报*, 2018,29(8):2601-2614.
- Sun Yunxia, Liu Zhaogang, Dong Lingbo. Spatial point patterns and their association dynamics of forest landscapes in Maershan Region, Northeast China between 1983 and 2016 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018,29(8):2601-2614.
- [25] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. *生态学报*, 2022,42(23):9483-9498.
- Hou Ruiping, Xia Chaozong, Chen Jian, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(23):9483-9498.
- [26] 朱静静, 师学义. 黄土丘陵山区土地利用空间自相关格局及其影响因素分析: 以晋城市长河流域为例[J]. *水土保持研究*, 2018,25(5):234-241.
- Zhu Jingjing, Shi Xueyi. Analysis of spatial autocorrelation patterns of land use and influence factors in Loess Hilly Region—a case study of changhe basin of Jincheng city [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(5):234-241.
- [27] 范立红, 朱建华, 李奇, 等. 三峡库区土地利用/覆被变化对碳储量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018,42(4):53-60.
- Fan Lihong, Zhu Jianhua, Li Qi, et al. Effects of changes in land use and cover on carbon storage in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018,42(4):53-60.
- [28] 李和平, 谢鑫, 李聪聪. 成渝双城地区景观格局的碳汇效应与优化建议: 基于 BP 神经网络的分析和预测[J]. *城市发展研究*, 2023,30(1):92-102.
- Li Heping, Xie Xin, Li Congcong. Carbon sink effects and optimization suggestions for landscape patterns in the chengdu-chongqing twin cities region: BP neural network-based analysis and prediction [J]. *Urban Development Studies*, 2023,30(1):92-102.
- [29] 付玉杰, 田地, 侯正阳, 等. 全球森林碳汇功能评估研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2022,44(10):1-10.
- Fu Yujie, Tian Di, Hou Zhengyang, et al. Review on the evaluation of global forest carbon sink function [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022,44(10):1-10.
- [30] 刘雅璇, 彭秋志, 黄培依, 等. 川西高原土地利用碳储量估算及多情景预测[J]. *水土保持学报*, 2024,38(1):207-219.
- Liu Yaxuan, Peng Qiuzhi, Huang Peiyi, et al. Estimation and multi scenario prediction of land use carbon storage in western Sichuan Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(1):207-219.
- [31] Xiang Shujiang, Wang Ying, Deng Hua, et al. Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,142:109205.