

2000—2020年三峡库区重庆段土地利用及碳储量估算*

万其林¹, 邵景安^{1,2}

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院; 2. 重庆师范大学三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要:以三峡库区重庆段为研究区,研究该区域土地利用与碳储量的变化,为该区域生态屏障保护与未来国土空间规划与土地管理提供一定理论参考。基于 GlobeLand30 的 2000、2010 与 2020 年共 3 期土地利用数据,运用 Markov 与 InVEST 模型分析 2000—2020 年研究区土地利用变化时空特征,并建立不同土地利用类型(后简称地类)碳密度数据库估算陆地生态系统碳储量。研究结果显示:1) 研究区土地利用结构以耕地和森林为主,两者面积之和占研究区总面积的 85% 以上。2000—2020 年,研究区土地利用转移主要发生在森林、草地、人造地表、水体与耕地之间。森林、水体与人造地表面积呈净增加态势,其中人造地表转移态度最高,达 17.33%;其余地类面积呈净减少趋势,耕地与草地面积有明显的减少。2) 研究区总碳储量在 2000—2020 年呈先增加后减少的变化态势,耕地向水体、人造地表转移是总碳储量减少的主要因素;耕地、草地向森林转移是总碳储量增加的主要因素。3) 研究区碳储量呈现“东部高于西部、库首高于库尾”且由库首向库尾渐进式降低的空间分布特征。碳源区聚集分布于重庆市中心城区与区县城镇周边与长江沿岸;碳汇区“大聚集、小分散”地分布于库首秦巴山区、巫山山脉以及库中七曜山、方斗山等区域。研究结果提示:2000—2020 年研究区生态功能进一步加强,退耕还林、还草与人工造林等政策措施得到了有效落实;高、低碳密度地类之间的转移是研究区碳储量变化的主要因素;人造地表侵占城镇周边耕地与森林的速度加快是 2000—2020 年研究区总碳储量减少的重要原因。

关键词:土地利用变化;碳储量;InVEST 模型;三峡库区重庆段

中图分类号:X171.1;F301.2

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)06-0052-13

在人类活动不断加深对自然环境影响的过程中,碳排放也随之逐渐增加,这成为了全球气候变暖的重要原因。土地几乎承载着所有的人类活动,土地利用和开发模式的变化改变着生态系统的结构与功能,从而影响到生态系统碳汇能力与碳储量的变化,例如:在城镇化过程中,大量农业用地向建设用地的转化会导致土地的碳汇面积减小而碳源面积增加;退耕还林、还草等生态保护措施则会减小土地的碳源面积并提升土地的碳汇能力^[1]。党的二十大报告提出:到 2035 年,中国发展的总体目标之一是要“广泛形成绿色生产生活方式,碳排放达峰后稳中有降,生态环境根本好转,美丽中国目标基本实现”^[2]。因此,在实现“双碳”目标的过程中,必然涉及土地利用结构的变化;而及时评估土地利用类型(后简称地类)变化与区域碳储量变化,对与区域生态系统碳循环及碳汇能力提升等相关的研究有着重要意义^[3]。

目前研究人员在计算碳储量时多采用 InVEST 模型碳储量模块,并将它广泛应用于山区^[4]、高原^[5]、流域^[6]等区域。杨洁等人^[7]、张平等^[8]模拟了不同情景下的生态系统碳储量,邓元杰等人^[9]则发现在生态保护与生态工程情景下能够有效控制碳储量的减少。此外,Zhao 等人^[10]在研究中发现:与西南山区情形不同,内蒙古农牧交错带草地土壤碳储量最高,且是森林与农田土壤碳储量的 1.8 倍与 1.5 倍。由此可见,不同区域生态系统土地利用与碳储量关系存在空间异质性。

三峡库区作为长江上游重点生态保护区域,维系着长江中下游的饮水安全,是中国重要的淡水资源战略储备库,三峡库区岸线生态保护修复,事关国家发展全局^[11]。当前关于三峡库区碳储量的研究主要集中于分析森林、湿地等单一地类生态系统的土壤碳密度以及植被与碳储量的关系^[12-15],而对由不同地类变化引起的碳储量变化关注不足。进入 21 世纪以来,三峡库区重庆段土地利用方式变化明显。受三峡工程建设影响,三峡库区沿岸大量土地被长期或周期性淹没形成消落带景观,库区移民与生态保护区搬迁人口对土地的需求促使库区地类

* 收稿日期:2022-08-30 修回日期:2023-03-16 网络出版时间:2023-06-12T11:35

资助项目:国家社会科学基金重大项目(No. 20&ZD096)

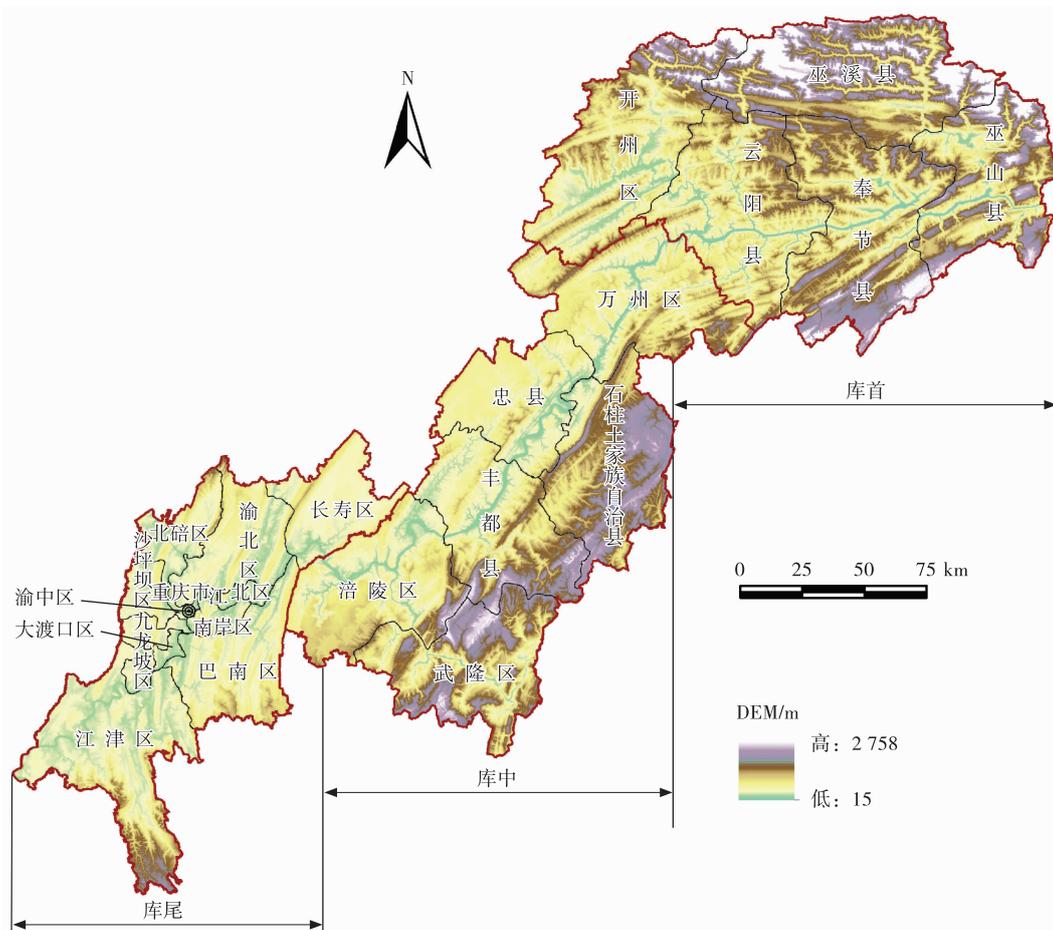
第一作者简介:万其林,男,研究方向为土地利用与土地管理,E-mail: kylin_wan@163.com;通信作者:邵景安,男,研究员,博士,E-mail: shao_ja2003@sohu.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20230609.1609.012

变化加剧。随着成渝地区双城经济圈建设的稳步推进,三峡库区重庆段社会经济快速发展,区域内农村人口大量流向城镇,农用地向城镇建设用地转化规模扩大;再加上因库区退耕还林还草等相应生态保护(修复)工程开展而产生的多重影响,三峡库区重庆段地类变化日益复杂。2000—2020 年,重庆市中心城区建设用地大量扩张,区域内碳储量急速下降,并呈现“四周高、中间低”的空间格局,并在此期间均呈现为“碳源”^[16]。基于上述背景,本研究以三峡库区重庆段为研究区,通过分析研究区土地利用和碳储量在 2000—2020 年间的时空分布格局及演变特征,进一步探究了三峡工程建设影响与生态工程建设背景下研究区土地利用结构变化对区域生态系统碳储量的影响,并揭示出研究区整体碳储量的格局及不同土地利用方式碳汇能力的差异,以便为研究区碳汇能力提升优先区域的选择和碳排放补偿机制的建设,以及探究双碳战略目标下研究区社会经济发展、生态文明建设、国土空间规划与未来土地管理等研究提供参考资料。

1 研究区概况

研究区下辖 22 个区县(图 1)。根据区域地形地貌特征,可将研究区分为库首、库中以及库尾,其中:库尾横穿重庆市中心城区,库中东屏七曜山与方斗山,库首位于秦巴山区。研究区地形地貌复杂,东高西低,库首高于库尾。研究区降水充沛,属于湿热地区;区内土地利用结构类型复杂,垂直差异明显。研究区内天然林较少,但由于退耕还林、还草及人工造林等生态保护措施的实施,区域内森林面积有所增加,且生态系统稳定性逐步提升。研究区社会经济呈现较为明显的二元结构,有重庆市中心城区、万州区等 2 个经济核心。据 2021 年《重庆统计年鉴》报道,2020 年研究区城镇化率达 64.68%,农村人口约 896.25 万人,地区生产总值达 9 691.57 亿元,第二、第三产业占比在 90%以上;三峡后续工作专项资金 2020 年完成库区生态环境建设与保护投资约 24.88 亿元。由于自然条件的限制以及研究区内生态工程等人为影响,库首区县的经济发展相对滞后。



注:底图来源于重庆市标准地图服务(<http://www.cqmap.com/bzdt/foot.html>),审图号:渝 S(2020)071 号,下同。

图 1 研究区概况

Fig. 1 The overview of the study area

2 数据来源及研究方法

2.1 土地利用数据来源及处理方法

本研究所用土地利用数据为国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)提供的 2000、2010 和 2020 年共 3 期 GlobeLand30 数据,该数据分辨率精度高达 30 m,总体地类分类精度超过 80%,并得到了各类土地利用研究的广泛应用。经数据解译后可知,2000—2020 年研究区地类为森林、草地、耕地、灌木地、湿地、水体与人造地表共 7 个大类。2000—2020 年研究区土地利用结构以耕地和森林为主,两者面积之和占研究区总面积的 85%以上,其他地类面积占比则相对较低(表 1),这与研究区具有山高坡陡的地形地貌以及区域内拥有大量农村人口有一定关系。本研究运用 Markov 模型结合地理信息系统技术,基于上述 3 期研究区土地利用情况,建立土地利用转移矩阵,制成土地利用转移桑基图和刻画土地利用变化专题图,分析土地利用转移数量与空间分布特征,并利用土地利用转移态度表征某地类在一段时期内转移的速度,有关计算公式如下:

$$R = [(S_{末} - S_{初}) / (S_{初} \times t)] \times 100\%$$

其中: R 为研究期内某地类转移态度,为正值时代表转入,为负值时代表转出; $S_{初}$ 和 $S_{末}$ 分别为某一地类转移初期与末期的面积(单位: hm^2); t 在本研究中取值为 10,表示地类转移时间为 10 a。

表 1 2000—2020 年研究区土地利用结构

Tab. 1 Land use structure in the study area from 2000 to 2020

地类	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/万 hm^2	面积占比	面积/万 hm^2	面积占比	面积/万 hm^2	面积占比
耕地	209.747	45.46%	209.183	45.33%	197.273	42.76%
森林	193.954	42.04%	202.873	43.96%	201.620	43.69%
水体	6.524	1.41%	7.413	1.61%	9.350	2.03%
湿地	0.472	0.10%	0.267	0.06%	0.080	0.02%
草地	43.741	9.48%	32.747	7.10%	32.036	6.94%
灌木地	2.920	0.63%	2.969	0.64%	2.878	0.62%
人造地表	4.071	0.88%	5.977	1.30%	18.192	3.94%

2.2 基于 InVEST 模型的碳储量估算

在 InVEST 模型碳储量模块中,生态系统碳储量被分为地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库共 4 个部分。本研究以各地类碳库的平均碳密度为基础来计算碳储量,有关计算公式如下:

$$C_i = (D_{1i} + D_{2i} + D_{3i} + D_{4i}) \times S_i, C_t = \sum_{i=1}^n C_i,$$

其中: C_i 表示第 i 类地类的碳储量(单位:t); S_i 为第 i 类地类的面积(单位: hm^2); D_{1i}, D_{2i}, D_{3i} 与 D_{4i} 分别为第 i 类地类地上、地下、土壤和死亡有机物的碳密度; C_t 为全部类型地类的总碳储量(单位:t)。碳密度是 InVEST 模型估算碳储量的重要参数^[17],解宪丽等人^[18]、李克让等人^[19]对中国植被以及土壤的碳密度进行了大量研究。本研究所用碳密度数据主要来源于 2010—2019 年中国陆地生态系统碳密度数据集^[20],选取囊括研究区经纬度范围内的各地类采样点实测碳密度数据平均值,并结合前人对三峡库区^[21]及相近区域相关研究文献得到研究区各地类的地上碳密度、地下碳密度以及 0~100 cm 土层的土壤碳密度数据^[22-24]。根据 Delaney 等人^[25]的研究成果可知,植被死亡有机物碳库内碳储量约为地上碳库量的 1/10,因此本研究将各地类的死亡有机物碳密度设定为地上碳密度的 1/10。经修正后得到研究区陆地生态系统碳密度数据库如表 2 所示。通过 InVEST 模型输入有关碳密度数据得到研究区各地类不同时期的碳储量数据。

3 结果与分析

3.1 土地利用转移数量特征

2000—2010 年研究区土地利用转移主要发生在森林、草地、人造地表、水体与耕地之间(表 3)。草地、耕地和湿地为净转出地类,其中又以湿地的转出速度最快,草地转出面积最大,湿地主要转出方向为水体,草地主要

转出方向为森林,灌木地变化则相对比较稳定。研究区森林、人造地表、水体和灌木地在 2000—2010 年为净转入地类,森林净转入面积最大,主要来源为退耕还林与草地造林;人造地表变化最为明显,转入速度最快,主要为耕地转入;水体增加主要来源于耕地与草地。

表 2 研究区陆地生态系统各地类的碳密度

Tab. 2 Carbon density of terrestrial ecosystem in the study area

t · hm⁻²

地类	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度	综合碳密度
耕地	3.45	0.68	41.02	0.35	45.50
森林	32.85	6.97	105.81	3.28	148.91
水体	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
湿地	2.10	6.82	56.17	0.21	65.30
草地	2.47	4.06	70.25	0.25	77.02
灌木地	8.67	4.05	82.90	0.87	96.49
人造地表	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3 2000—2020 年各阶段研究区土地利用转移矩阵

Tab. 3 Land use transfer matrix of the study area in each stage from 2000 to 2020

万 hm²

时间阶段	地类	耕地	森地	水体	湿地	草地	灌木地	人造地表	2000 年总计
2000—2010 年	耕地	197.503	6.781	0.909	0.017	2.280	0.102	2.156	209.748
	森地	6.568	185.072	0.693	0.003	1.425	0.164	0.028	193.953
	水体	0.586	0.196	5.064	0.121	0.480	0.038	0.038	6.523
	湿地	0.066	0.011	0.238	0.069	0.079	0.003	0.007	0.473
	草地	3.713	10.592	0.452	0.049	28.333	0.116	0.486	43.741
	灌木地	0.058	0.213	0.004	0.000	0.099	2.544	0.002	2.920
	人造地表	0.652	0.038	0.053	0.009	0.056	0.002	3.261	4.071
	2010 年总计	209.146	202.903	7.413	0.268	32.752	2.969	5.978	461.429
	变化量	-0.602	8.950	0.890	-0.205	-10.989	0.049	1.907	
	R	-0.03%	0.46%	1.36%	-4.33%	-2.51%	0.17%	4.68%	
2010—2020 年	耕地	184.839	8.325	1.090	0.007	3.667	0.279	10.976	209.183
	森地	8.524	185.783	0.496	0.003	6.421	0.856	0.790	202.873
	水体	0.326	0.124	6.752	0.024	0.093	0.004	0.090	7.413
	湿地	0.005	0.004	0.187	0.042	0.010	0.000	0.019	0.267
	草地	3.148	6.549	0.738	0.004	21.310	0.460	0.539	32.748
	灌木地	0.286	0.816	0.055	0.000	0.489	1.278	0.044	2.968
	人造地表	0.143	0.019	0.032	0.001	0.047	0.001	5.734	5.977
	2020 年总计	197.271	201.620	9.350	0.081	32.037	2.878	18.192	461.429
	变化量	-11.911	-1.253	1.937	-0.188	-0.711	-0.090	12.215	
	R	-0.57%	-0.06%	2.61%	-6.97%	-0.22%	-0.30%	20.44%	

2010—2020 年研究区耕地、森林、草地、湿地和灌木地为净转出地类,其中以耕地净转出的面积最大,达 11.912 万 hm²,转出方向以森林与人造地表为主,转出速度最快的依然是湿地。研究区森林面积呈现出减少趋势,减少了约 1.253 万 hm²,水体与人造地表为森林的主要净转出方向,其中又以转入为人造地表为主(表 3)。森林转向人造地表主要与城镇的向外扩张有关,且主要分布在重庆中心城区周围以及各区县城镇周边;森林转向水体的主要原因则为旅游景区的开发与长江水域面积增加(图 2)。2010—2020 年研究区人造地表和水体为

净转入,分别转入了 12.215 万 hm^2 和 1.937 万 hm^2 ;其中人造地表转入面积最大、转入速度最快,与 2000—2010 年人造地表的转化情况相比,转移速度加快了近 3.4 倍,面积相比 2010 年的 5.977 万 hm^2 扩张了 2 倍左右,主要来源于耕地;水体面积在 2010—2020 年间增幅接近 26.12%,主要来源为耕地和草地。2010—2020 年研究区森林转移动态最小,整体变化相对稳定。

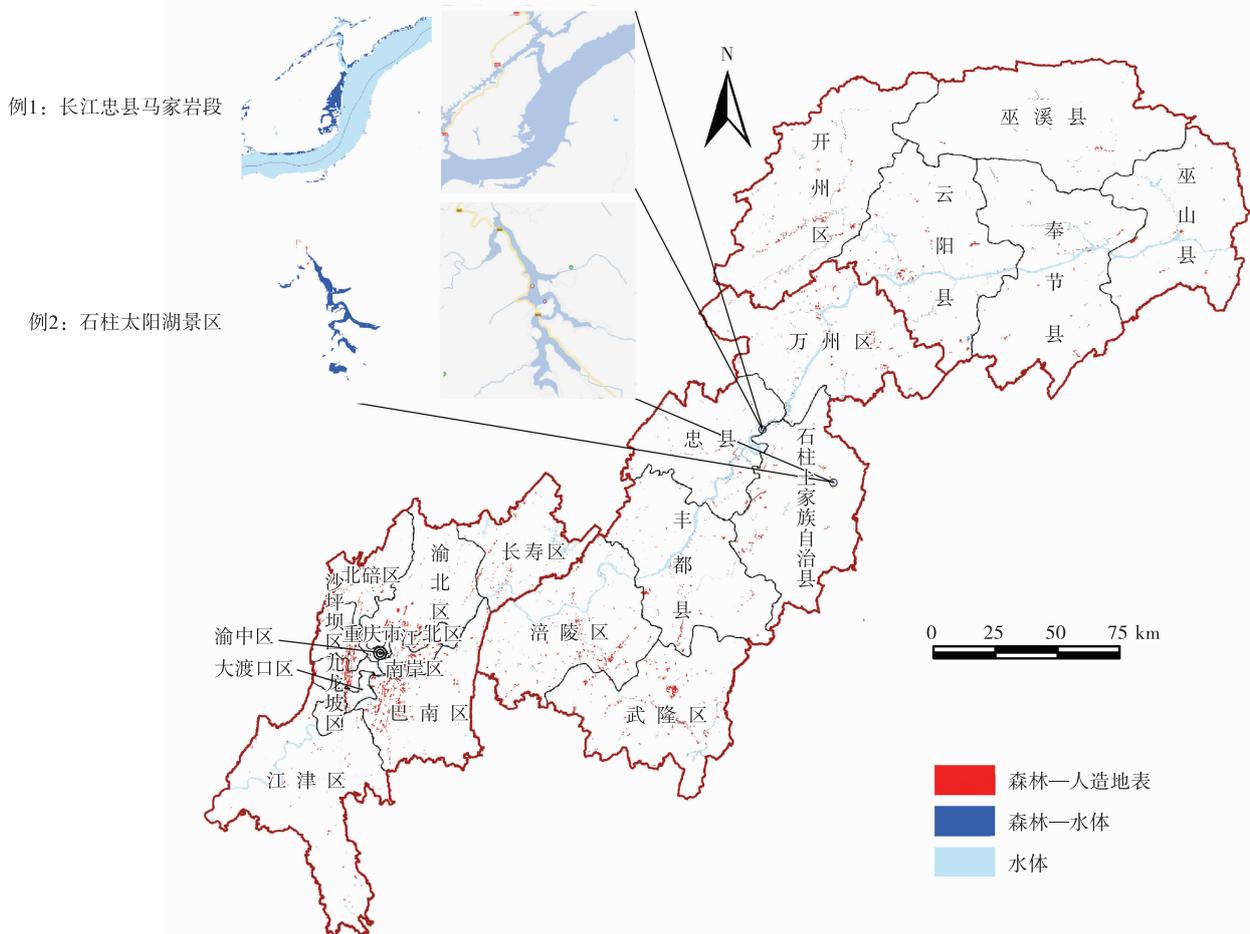


图 2 2000—2020 年研究区森林主要净转出地类分布

Fig. 2 Distribution of main net forest translocation in the study area from 2000 to 2020

从整体上看,2000—2020 年研究区地类转移主要发生在耕地、森林、草地与人造地表之间(表 4)。2000—2020 年,耕地、草地、湿地与灌木地为净转出,其中耕地与草地的净转出面积最大;2000—2010 年耕地主要转出方向为森林与人造地表,其中转向森林部分的面积最大,2010—2020 年耕地的转出方向仍然为森林与人造地表且转移面积均超过了 2000—2010 年时向森林与人造地表转移的面积,但以转向人造地表为主。草地主要转移方向为森林与耕地。2000—2020 年净转入的地类为人造地表、森林以及水体。人造地表转入面积最大,转移速度越来越快;相比于 2000 年,2020 年人造地表面积扩大了近 3 倍,其中超过 80% 的面积来自于耕地转入,这与耕地的建设适宜性和农业适宜性呈正相关关系密不可分。人造地表的转出方向主要是耕地,这与废弃建设用地复垦有一定关系。森林的转入主要来自于耕地和草地,这主要与研究区内实施的一系列退耕还林、还草等措施有关。

3.2 地类转移空间分布特征

从整体上看,研究区 2000—2020 年地类转移聚集程度在空间上呈现出以重庆中心城区为核心、长江为变化轴向四周逐渐降低的趋势,其中重庆中心城区与其他各区县建成区周围地类转移概率相对较高(图 3a)。从研究区各分段角度来看,研究区主要土地利用转移类型在空间上呈渐进式分布的特征,例如:退耕还林和草地造林主要发生于山区,且森林面积从库首到库尾逐渐降低;而人造地表对耕地和生态用地的侵蚀从库首到库尾段则逐渐加剧(表 5)。

2000—2020 年,研究区耕地在转入方面呈现相对均匀散布的空间分布特征,但在转出方面存在相对聚集的

空间分布特征(图 3b)。耕地转向人造地表呈现出围绕建成区和长江水域聚集分布的特征,这与耕地主要转向人造地表的数量特征相印证。结合表 5 可知,2000—2020 年研究区耕地转向人造地表的面积呈现出库首向库尾方向持续增加的渐进式空间分布特征,其中库尾处耕地转入人造地表面积约 9.210 万 hm^2 ,占研究区耕地转入人造地表总转移面积的 72%左右,这一现象尤其在重庆市中心城区最为明显。此现象与大量农村人口向区县城镇与重庆市中心城区流动、城镇化及城镇面积扩张的速度加快有重要关系。此外,耕地向森林转移的现象主要出现在库首,约 6.835 万 hm^2 ,占研究区耕地向森林转移总面积的 59%左右,且主要出现在秦巴山区、巫山山脉等区域;库中处耕地向森林转移的现象相对聚集地发生在七曜山与方斗山。最后,库中长江沿岸还出现了耕地向水体转移的现象,说明从 2000 年到 2020 年,长江水位有所上涨。

表 4 2000—2020 年研究区土地利用转移矩阵

Tab. 4 Land use transfer matrix of the study area from 2000 to 2020

万 hm^2

年份	地类	2020 年							2000 年总计
		耕地	森林	水体	湿地	草地	灌木地	人造地表	
2000 年	耕地	179.327	11.535	1.647	0.010	4.206	0.280	12.741	209.747
	森林	11.395	174.109	0.926	0.007	5.899	0.833	0.786	193.954
	水体	0.548	0.125	5.534	0.012	0.164	0.008	0.133	6.524
	湿地	0.052	0.003	0.340	0.014	0.038	0.002	0.023	0.472
	草地	5.234	14.991	0.812	0.035	21.195	0.453	1.020	43.741
	灌木地	0.253	0.824	0.024	—	0.476	1.300	0.043	2.920
	人造地表	0.462	0.033	0.067	0.002	0.059	0.002	3.446	4.071
	2020 年总计	197.273	201.620	9.350	0.080	32.036	2.878	18.192	461.429
净转入或净转出	-12.474	7.665	2.826	-0.392	-11.704	-0.042	14.121		
R	-0.30%	0.20%	2.17%	-4.16%	-1.34%	-0.07%	17.35%		

2000—2020 年研究区森林净转出主要为人造地表与水体,在空间格局上,森林的转出呈现出大分散但小聚集分布于城镇附近山区的特征(图 3c)。森林开发为人造地表的情形主要出现于库中和库尾,占研究区森林向人造地表转移面积的 85%左右,且主要分布于城镇周边,其中又以重庆中心城区的“四山”区域与武隆区仙女山街道的有关变化更为明显。人造地表以转入为主,与图 3b 对应,耕地转入人造地表明显集中于重庆市中心城区以及各县城周边(图 3d)。与退耕还林空间格局类似,2000—2020 年研究区草地造林面积超过 89%来源于库首与库中,且主要分布于山区,其中又以库首处的相关变化最为明显(图 3e)。此外,研究区水体转移主要呈现为沿长江两岸扩散的空间特征(图 3f)。对 2000—2020 年研究区长江水域进行缓冲区分析,发现沿长江水域 50 m 的缓冲区内有近 63%的土地转为水体。这与三峡工程的蓄水和生态治理有重要关系。自三峡工程竣工以来,三峡库区长江水域水位上涨,乌江流域、石柱县马家河水域、长寿区长寿湖区域、武隆区芙蓉江景区等水域面积均有明显增加。

3.3 基于土地利用变化视角的碳储量变化

根据范立红等人^[21]的研究可知,在 2000—2015 年三峡库区各地类碳密度变化较小,且区域内碳储量的变化主要是由土地利用变化所引起,因此本研究主要从土地利用变化视角来分析研究区的碳储量变化。

表 6 显示,2000、2010 和 2020 年研究区总碳储量分别为 42 106.70 万 t、42 553.69 万 t 和 41 749.45 万 t。从地类上看,森林与耕地的碳储量占研究区总碳储量的 90%以上;森林的碳储量最高,占研究区总碳储量 70%左右。这得益于森林较高的固碳能力与面积占比。2000—2010 年研究区总碳储量净增加了 447 万 t,其中:森林碳储量的增加量最大,占总增加量 75%左右;草地碳储量的减少量最大,共减少了 846.74 万 t。然而在 2010—2020 年,研究区总碳储量减少 804.25 万 t,其中耕地的碳储量减少量占总减少量的 67%左右。出现这一情况的主要原因与这一时期研究区人造地表等低固碳能力地类扩张速度过快有关:虽然秦巴山区以及巫山山脉、七曜山、方斗山等区域森林转入面积仍然增加,但因研究区大量耕地与城镇周边森林被转出、高固碳地类变为低固碳地类,由此导致了研究区总碳储量下降。

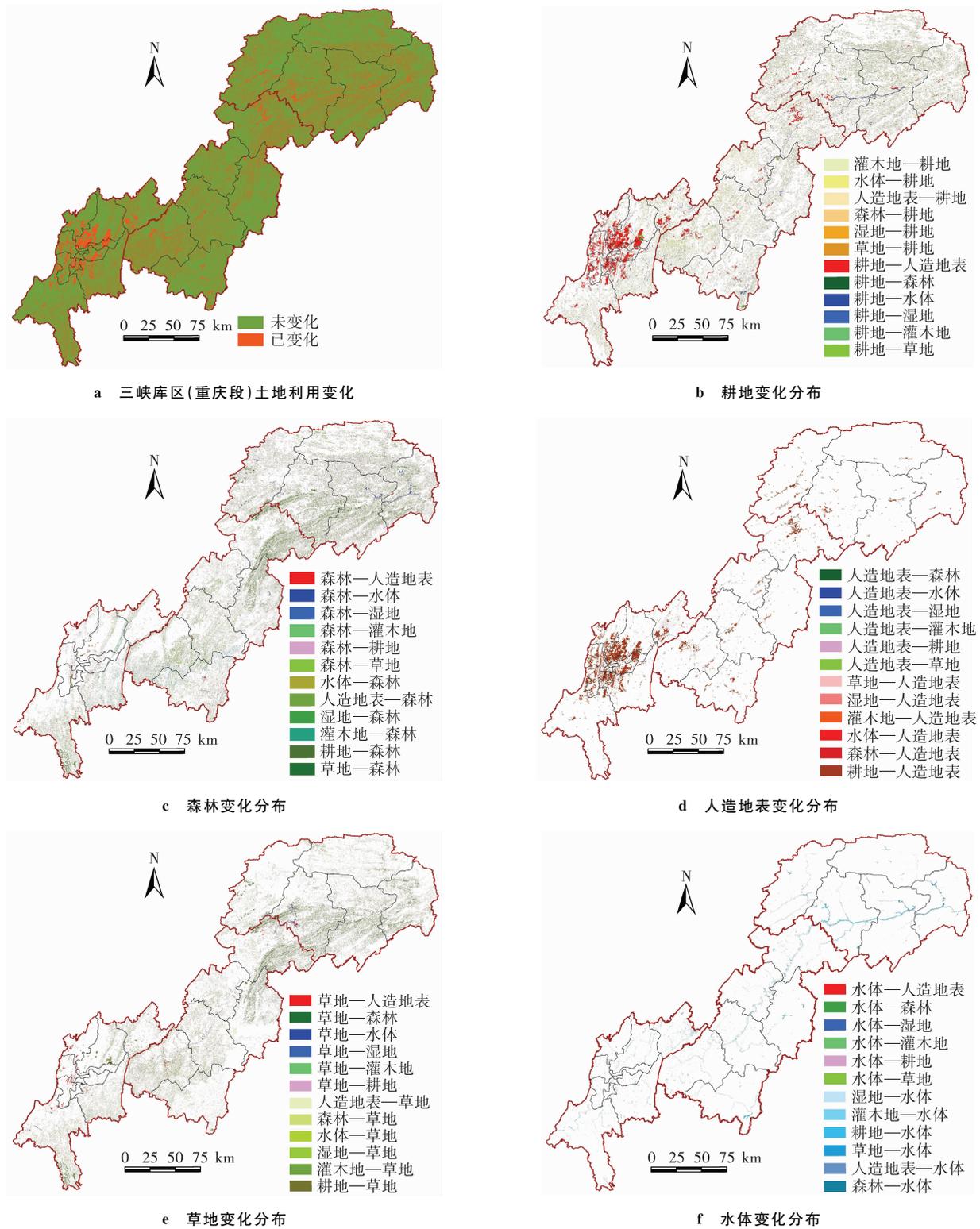


图 3 2000—2020 年研究区各地类转移空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of class transfer in the study area from 2000 to 2020

表 6 还显示出 2000—2020 年研究区总碳储量呈先增加后减少的特征。耕地、森林和草地是影响研究区碳储量变化的主要地类,其中森林碳储量的净增加量最大而草地与耕地碳储量的净减少量最大。2000—2020 年研究区只有森林碳储量为净增加,主要由草地向森林转入(碳储量增加了 1 679.84 万 t)和耕地向森林转入(碳储量增加了 1 141.46 万 t)所贡献;碳储量减少部分主要由耕地转入人造地表(碳储量减少了 1 146.72 万 t)、森林转入耕地(碳储量减少了 1 129.23 万 t)以及森林转入草地(碳储量减少近 661.23 万 t)构成;灌木地碳储量的变化

最为稳定,基本保持不变(图 4)。

表 5 2000—2020 年研究区土地利用转移主要类型
Tab. 5 Main types of land use transfer in the study area from 2000 to 2020

万 hm²

研究区分段	草地—森林	耕地—人造地表	耕地—森林	森林—人造地表
库首	7.468	1.177	6.835	0.105
库中	5.962	2.354	3.532	0.276
库尾	1.562	9.210	1.168	0.404

表 6 2000—2020 年各地类碳储量及变化量
Tab. 6 Carbon storage and change in different regions from 2000 to 2020

万 t

年份	耕地碳储量	森林碳储量	湿地碳储量	草地碳储量	灌木地碳储量	各地类碳储量总计
2000 年	9 543.49	28 881.71	30.84	3 368.92	281.74	42 106.70
2010 年	9 517.84	30 209.77	17.46	2 522.17	286.44	42 553.69
2020 年	8 975.90	30 023.18	5.21	2 467.44	277.72	41 749.45
2000—2010 年碳储量变化量	-25.65	1 328.06	-13.37	-846.74	4.70	447.00
2010—2020 年碳储量变化量	-541.94	-186.59	-12.25	-54.74	-8.72	-804.25
2000—2020 年碳储量变化量	-567.59	1 141.46	-25.63	-901.48	-4.02	-357.25

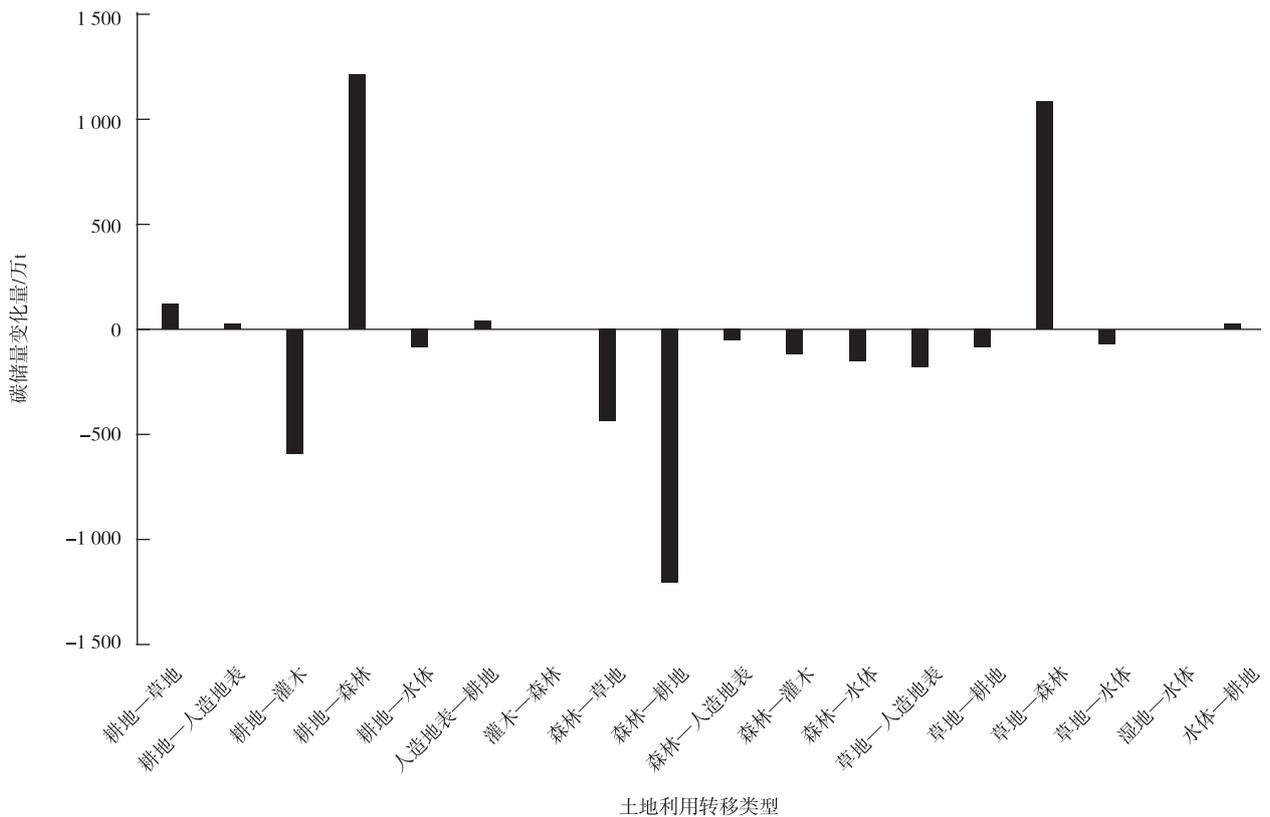


图 4 2000—2020 年研究区主要土地利用转移类型及碳储量变化

Fig. 4 Changes of main land use transfer types and carbon storage in the study area from 2000 to 2020

3.4 基于时间尺度的碳储量及碳源碳汇区空间分布特征

基于 GLOBE Land30 栅格数据与研究区碳密度数据库得到时间尺度上的碳储量空间分布灰度值图与碳源碳汇区分布图(图 5)。整体上看,研究区碳储量在 2000、2010 和 2020 年均呈现出“东部高于西部、库首高于库尾”的空间分布特征(图 5a、b、c)。在研究区西部的平行岭谷区,碳储量呈现出以重庆市中心城区为核心、各区县城

镇为次核心向周围递增的特征,表明人类活动强度对该区域碳储量具有重要影响。结合时间尺度进行分析,可以发现城镇聚集的低碳密度区域正逐步扩张(图 5a、b、c)。

从向大气释放或固定二氧化碳的角度衡量,将碳库分为碳汇和碳源,当净固碳量为正时即为碳汇,反之则为碳源。在本研究中,将碳储量净减少并对外释放碳的区域视为碳源区,将土地利用变化引起的植被覆被度变大从而使固碳量和碳储量净增加的区域视为碳汇区;碳储量相对不变(净增加/减少量基本为 0)的区域视为碳收支平衡区。图 5d 显示:研究区 2000—2020 年碳源区具有相对集聚的空间特征,且呈现出以重庆中心城区为主要碳源核心、其余区县城镇为次碳源核心以及沿长江两岸呈带分布的空间特征。人造地表的扩张对城镇周围耕地、森林的侵占向外释放了大量的碳,导致相关区域净固碳量减少。自三峡工程建成以来,由于三峡库区的蓄洪与泄洪使库区沿长江两岸形成了消落带景观格局,并在消落带内形成了新的植被生态系统,但该区域内的耕地和森林转变为消落带景观的过程是失碳过程,这是 2000—2020 年研究区长江沿岸成为碳源区的重要原因之一。研究区的碳汇区“大聚集、小分散”地分布于库中与库首的七曜山、方斗山、武陵山区、秦巴山区等区域,这主要得益于这些区域内低效耕地退耕还林和还草力度加大、三峡库区长江流域防护林体系建设、三峡库区生态补偿机制的建立以及三峡库区水土保持和库岸防护治理相关生态保护政策的落实。

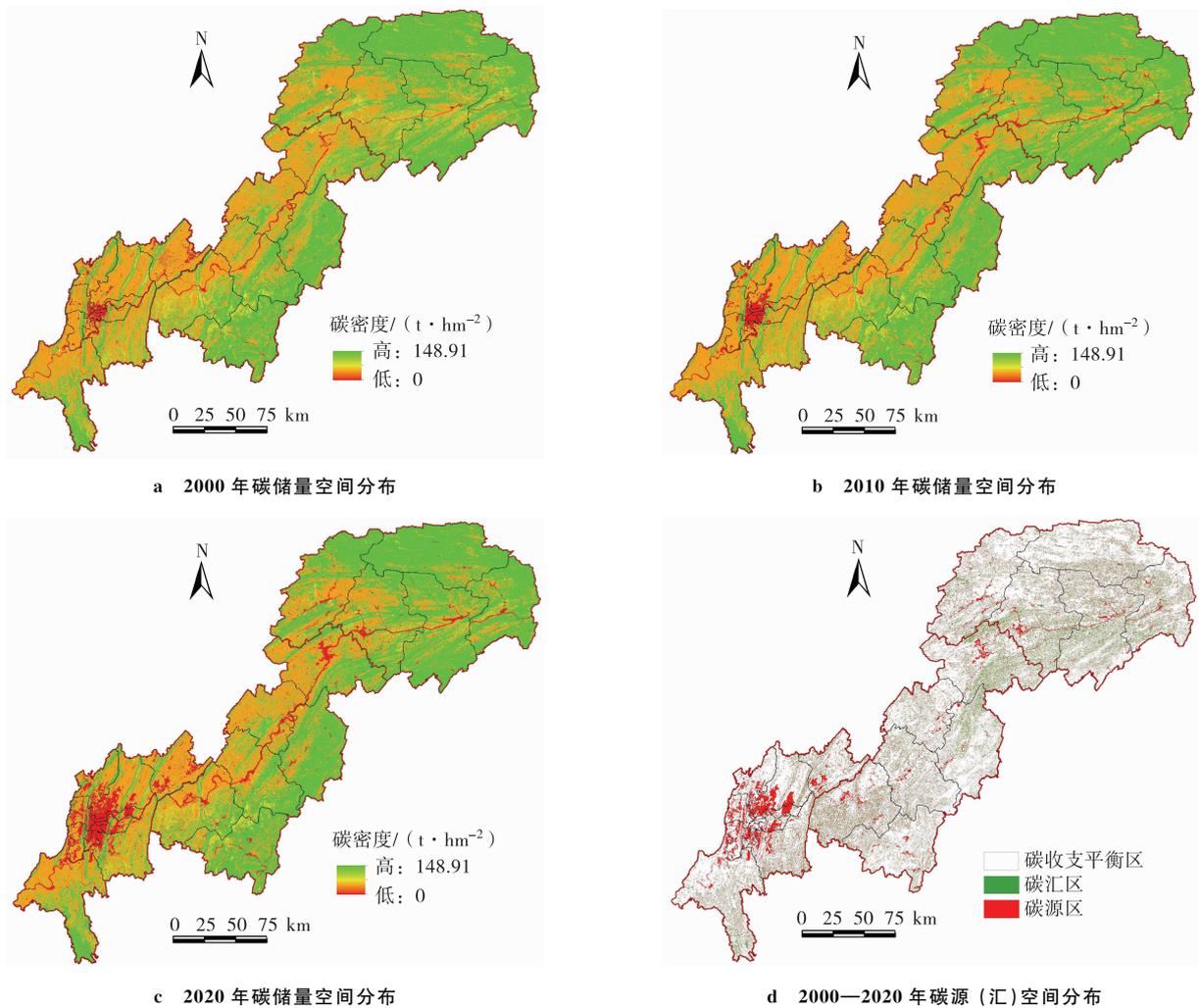


图 5 2000—2020 年研究区碳储量空间分布灰度值及碳源(汇)区分布

Fig. 5 Gray value of carbon storage spatial distribution and carbon source (sink) area distribution in the study area from 2000 to 2020

4 结论与讨论

4.1 结论

研究区的土地利用结构以耕地与森林为主,两者面积之和占全域总面积的 85% 以上。从整体上看,2000—

2020年研究区土地利用变化以耕地、森林、草地与人造地表之间的转移较为明显。森林、水体与人造地表的面积呈净增加态势,其中人造地表转移动态最高,达17.33%;其余地类的面积呈净减少态势,其中耕地与草地的面积减少较为明显。研究区在整个研究时段的土地利用转移特征主要表现为耕地快速向人造地表与森林转移、草地大量向森林转移、长江沿岸各种地类大量转为水体等。人造地表及耕地的变化与2000—2020年重庆市社会经济高速发展、建成区不断扩张以及耕地自身具有较好的建设适宜性有重要联系。耕地与草地向森林转移的过程主要集中在库首与库中的秦巴山区、七曜山、方斗山和巫山山脉等区域,表明2000—2020年研究区生态功能进一步加强,退耕还林、还草与人工造林等政策及相关措施得到了较好的落实。

高、低碳密度地类间的转移是碳储量变化的主要因素。高碳密度地类向低碳密度地类转移会促进碳源效应,反之则促进碳汇效应。地类的变化引起地类碳密度的变化,碳密度是估算碳储量的重要依据。研究区森林的碳密度最高,之后灌木地、耕地、草地与湿地的碳密度则依次减小,这与揣小伟等人^[26]研究结果相似。总的看来,植被覆盖度高的地区生物固碳能力强、固碳量和碳密度高,相应的碳储量也高。

2000—2020年研究区总碳储量呈现下降趋势,人造地表侵占城镇周边耕地与森林的速度加快是其中重要原因。在时间上,研究区内土地利用变化引起的碳储量变化呈现先增加后减少的数量特征,其中碳汇效应主要得益于草地造林以及退耕还林带来的碳储量增加。2000—2010年研究区总碳储量的增加主要与草地向森林的转移有关;2010—2020年研究区耕地碳储量的减少是碳源效应产生的主要原因。在空间上,研究区内碳源区主要聚集分布于长江两岸、重庆市中心城区与各区县城镇四周;碳汇区“大聚集、小分散”地分布于库首的秦巴山区与巫山山脉以及库中的七曜山、方斗山与武陵山区等区域。

4.2 讨论

在成渝地区双城经济圈建设与“双碳”战略双重背景下,研究区在进行国土空间规划与调控时,需统筹区域发展,加快库区内部生态补偿机制建设。首先,持续推进研究区陡坡耕地等不适宜耕地退耕还林还草,在规范城市规划建设的同时控制城镇建设用地扩张速度。其次,为协调区域社会经济发展与“双碳”目标的早日实现,在响应低碳经济的同时,应加快完善研究区内碳排放补偿机制,推进经济发达区域对生态功能区反哺机制的建设。最后,应以提升区域碳汇能力为导向,优先对生态形势严峻的区域采取相应的生态保护(修复)措施,提升研究区陆地生态系统蓄碳功能。

需要注意的是,本研究所用土地利用数据在现有研究尺度上有较高精度,但在土地利用变化量的分析中还应采用更高精度的土地利用数据。此外,过去许多研究以相近区域并结合全国尺度碳密度值为基础,运用Giardina等人^[27]、Alam等人^[28]、陈光水等人^[29]研究中的关系模型,并以年平均气温和年平均降水量作为修正土壤、生物量中碳密度的因子,从而得到了待考察区域的碳密度数据。而在本研究中,三峡库区的年平均降水量超过1100mm,已超出上述研究采用的修正公式适用范围,为此本研究运用了徐丽等人^[20]碳密度数据集,再结合其他学者的研究成果,从而得到了准确度更高的数据。但本研究采用的这一方法存在一定缺陷,即:有关数据获取的时间相隔较大,而且各地类不同碳库碳密度随时间变化的因素将导致估算数据与真实值误差变大。同时,InVEST模型的碳储量模块也具有一定的局限性,因为它忽略了相同地类各碳库自身碳密度在空间距离变大时的地域分异。因此,期望相关研究方法能得到继续改进,以便进一步推进三峡库区生态补偿机制建设及未来国土空间格局方面的研究。

参考文献:

- [1] 李缘缘,魏伟,周俊菊,等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. 环境科学,2022,44(3):1267-1276.
LI Y Y, WEI W, ZHOU J J, et al. Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China[J]. Environmental Science, 2022, 44(3): 1267-1276.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 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[EB/OL]. (2022-10-25)[2022-11-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects: report to the 20th national congress of the communist party of

- China[EB/OL]. (2022-10-25)[2022-11-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
- [3] 卿苗,赵军,冯超,等. 1980—2030 年石羊河流域生态系统碳储存服务对土地利用变化的响应[J]. 生态学报,2022,42(23):9525-9536.
- QING M,ZHAO J,FENG C,et al. Response of ecosystem carbon storage service to land-use change in Shiyang River Basin from 1980 to 2030[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2022,42(23):9525-9536.
- [4] 沈会涛,张韬,马文才,等. 太行山东坡不同林龄杏树林碳储量及其分配特征[J]. 生态学报,2018,38(18):6722-6728.
- SHEN H T,ZHANG T,MA W C,et al. Carbon storage and its allocation pattern in *Armeniaca vulgaris* plantations at different ages on the eastern slope of Taihang Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2018,38(18):6722-6728.
- [5] 夏敏,王行,刘振亚,等. 四川若尔盖高原 3 种湿地生态系统的碳储量及碳汇价值[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2020,49(3):392-398.
- XIA M,WANG H,LIU Z Y,et al. Carbon stock and its value for 3 types of wetland ecosystems on Zoige Plateau,Sichuan Province[J]. *Journal of Fujian Agriculture and forestry University (Natural Science Edition)*,2020,49(3):392-398.
- [6] 刘洋,张军,周冬梅,等. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报,2021,41(10):4052-4065.
- LIU Y,ZHANG J,ZHOU D M,et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2021,41(10):4052-4065.
- [7] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
- YANG J,XIE B P,ZHANG D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2021,29(6):1018-1029.
- [8] 张平平,李艳红,殷浩然,等. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. 自然资源学报,2022,37(5):1183-1197.
- ZHANG P P,LI Y H,YIN H R,et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China[J]. *Journal of Natural Resources*,2022,37(5):1183-1197.
- [9] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响:以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J]. 自然资源学报,2020,35(4):826-844.
- DENG Y J,YAO S B,HOU M Y,et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models:a case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*,2020,35(4):826-844.
- [10] ZHAO W,HU Z M,LI G S,et al. Impact of land use conversion on soil organic carbon stocks in an agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia[J]. *Journal of Geographical Sciences*,2017,27(8):999-1010.
- [11] 李昌晓. 三峡库区消落带生态修复治理专题[J]. 西南大学学报(自然科学版),2022,44(7):1.
- LI C X. Ecological restoration and management of the water-level-fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir Area. [J] *Journal of Southwest University (Natural Science)*,2022,44(7):1.
- [12] 田耀武,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区兰陵流域森林土壤有机碳、有机质与容重间的回归模型[J]. 华南农业大学学报,2016,37(1):89-95.
- TIAN Y W,HUANG Z L,XIAO W F,et al. Organic carbon,organic matter and bulk density regression models for forest soils in Lanlingxi watershed,Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of South China Agricultural University*,2016,37(1):89-95.
- [13] 施鹏程,彭道黎,黄国胜,等. 三峡库区乔木林生物量和碳储量的估算[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(6):1052-1059.
- SHI P C,PENG D L,HUANG G S,et al. Estimation of forest biomass and carbon stock in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2015,24(6):1052-1059.
- [14] 王雪军,张煜星,黄国胜,等. 三峡库区森林生产力和固碳能力估算[J]. 生态科学,2014,33(6):1114-1121.
- WANG X J,ZHANG Y X,HUANG G S,et al. Estimation of forest productivity and carbon storage in Three Gorges Reservoir [J]. *Ecological Science*,2014,33(6):1114-1121.
- [15] 王鹏程,邢乐杰,肖文发,等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量[J]. 生态学报,2009,29(1):97-107.
- WANG P C,XING L J,XIAO W F,et al. Organic carbon density and storage of forest ecosystems in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2009,29(1):97-107.
- [16] 向书江,张骞,王丹,等. 近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. 自然资源学报,2022,37(5):1198-1213.
- XIANG S J,ZHANG Q,WANG D,et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area

- of Chongqing during 2000–2020[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1198-1213.
- [17] 戴巍, 赵科理, 高智群, 等. 典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7528-7538.
DAI W, ZHAO K L, GAO Z Q, et al. Spatial variation characteristics of carbon density and storage in forest ecosystems in a typical subtropical region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7528-7538.
- [18] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soil of China and spatial analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35-43.
- [19] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1): 72-80.
LI K R, WANG S Q, CAO M K. Vegetation and soil carbon storage in China[J]. *Scientia Sinica (Series D)*, 2003, 33(1): 72-80.
- [20] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. *中国科学数据*, 2019, 4(1): 90-96.
XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s)[J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [21] 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 L H, ZHU J H, LI Q, 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 Science Edition)*, 2018, 42(4): 53-60.
- [22] 陈雅如. 三峡库区森林生产力与碳储量对景观格局变化的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
CHEN Y R. The response of forest productivity and carbon storage to landscape pattern change in Three Gorges Reservoir Area[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.
- [23] 周金霖, 黄阳, 陈佳婧, 等. 重庆市农田土壤有机碳时空变化与固碳潜力分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3647-3654.
ZHOU J L, HUANG Y, CHEN J J, et al. Analysis on temporal and spatial variations of organic carbon and carbon sequestration potential in farmland soil in Chongqing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3647-3654.
- [24] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 966-975.
HUANG C D, ZHANG J, YANG W Q, et al. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 966-975.
- [25] DELANEY M, BROWN S, LUGO A E, et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela[J]. *Biotropica*, 1998, 30(1): 2-11.
- [26] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. *资源科学*, 2011, 33(10): 1932-1939.
CHUAI X W, HUANG X J, ZHENG Z Q, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu Province[J]. *Resources Science*, 2011, 33(10): 1932-1939.
- [27] GIARDINA C P, RYAN M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 858-861.
- [28] ALAM S A, STARR M, CLARK B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study[J]. *Journal of Arid Environment*, 2013, 89: 67-76.
- [29] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(1): 34-42.
CHEN G S, YANG Y S, LIU L Z, et al. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(1): 34-42.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Land Use and Carbon Storage Estimation in the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

WAN Qilin¹, SHAO Jing'an^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Taking the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area as the research area, the changes of land use and carbon

storage in this area were studied to provide some theoretical references for ecological barrier protection, future territorial spatial planning and land management in this area. Based on GlobeLand30's three periods of land use data in 2000, 2010 and 2020, Markov and InVEST models were applied to analyze the spatio-temporal characteristics of land use change in the study area from 2000 to 2020, and carbon density databases of different land use types (hereafter referred to as land classes) were established to estimate the carbon storage of terrestrial ecosystems. The results showed that: 1) the land use structure of the study area was mainly composed of forest and cultivated land, accounting for more than 85% of the total area of the study area. From 2000 to 2020, land use transfer in the study area mainly occurred between forest, grassland, artificial surface, water body and cultivated land. The area of forest, water body and artificial surface showed a net increase, in which the artificial surface movement attitude was the highest, reaching 17.33%. The area of other land types showed a net decrease trend, and the area of cultivated land and grassland had a significant decrease. 2) From 2000 to 2020, the total carbon storage of the study area increased first and then decreased, and the transfer of cultivated land to water and artificial surface was the main factor of the decrease of total carbon storage. The transfer of cultivated land and grassland to forest was the main factor for the increase of total carbon storage. 3) In terms of space, carbon storage in the study area presents the characteristics of "high in the east and low in the west, more in the north and less in the south" and gradually decreases from the head of the reservoir to the end of the reservoir. The carbon source areas are concentrated and distributed in the downtown area of Chongqing, the surrounding areas of counties and towns, and along the Yangtze River. The carbon sinks are mainly concentrated in Qinba Mountain, Wushan Mountain, Qiyao Mountain and Fangdou Mountain. The results suggest that the ecological function of the study area has been further strengthened from 2000 to 2020, and the policies and measures of returning farmland to forest, grassland and afforestation have been effectively implemented. The transfer between high carbon density and low carbon density is the main factor of carbon storage change in the study area. The rapid encroachment of man-made surface into farmland and forests around cities and towns is an important reason for the decrease of total carbon storage in the study area from 2000 to 2020.

Keywords: land use change; carbon storage; InVEST model; the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

(责任编辑 方 兴)