

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.004

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.

川西高原土地利用碳储量估算及多情景预测

刘雅璇^{1,2}, 彭秋志^{1,3}, 黄培依¹, 陈 笛¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3. 云南省自然资源与规划智慧创新实验室, 昆明 650093)

摘 要: [目的] 区域碳储量与土地利用密切相关。在“双碳”目标下, 从碳储量视角开展重点区域土地利用变化预测研究, 对协调与优化区域土地利用格局、提高区域生态系统未来固碳潜力具有重要参考价值。[方法] 以川西高原为研究区, 以 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用为数据源, 预测不同情景下 2030 年土地利用, 结合修正的土地利用碳密度数据和 InVEST 模型估算区域碳储量变化。[结果] (1) 从各地类相对研究区的面积占比变化看, 2000—2020 年草地从 65.20% 逐步缩减到 63.65%, 林地从 31.73% 不断扩张到 32.92%, 未利用地先减后增且净增 0.57%, 水域和耕地先增后减均净减 0.11%, 湿地持续增加, 共净增 0.07%; 研究区 2000 年、2010 年、2020 年碳储量分别为 24.26×10^8 , 24.29×10^8 , 24.27×10^8 t, 呈先增后减趋势。(2) 与 2020 年相比, 2030 年自然发展情景下碳储量减少 3.19×10^5 t, 在耕地保护情景、生态保护情景、耕地生态联合保护情景下将分别固碳 4.29×10^6 , 9.72×10^6 , 9.60×10^6 t。[结论] 扭转未利用地的扩张趋势, 在保持耕地面积的基础上继续稳步推行生态保护政策, 提高川西高原陆地生态系统固碳潜力并助力其成为重要“碳汇”区域应成为川西高原国土空间规划和管控的关注重点。

关键词: 川西高原; 碳储量; 土地利用; InVEST 模型; CA—Markov 模型

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0207-13

Estimation and Multi Scenario Prediction of Land Use Carbon Storage in Western Sichuan Plateau

LIU Yaxuan^{1,2}, PENG Qiuzhi^{1,3}, HUANG Peiyi¹, CHEN Di¹

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment (IMHE), Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. Yunnan Natural Resources and Planning Intelligence Innovation Laboratory, Kunming 650093, China)

Abstract: [Objective] Regional carbon storage is closely related to land use. Under the goal of “carbon peaking and carbon neutrality”, researches about land use change calculations in significant regions play an important role on coordinating and optimizing regional land use patterns, improving the future carbon sequestration potential of regional ecosystems. [Methods] Taking Western Sichuan Plateau as the study area this paper predicts land use changes under different scenarios from 2020 to 2030, and estimates regional carbon storage changes by using revised land use carbon density data and land use data in 2000, 2010 and 2020. [Results] (1) From 2000 to 2020, grassland gradually decreased from 65.20% to 63.65%, forest continuously expanded from 31.73% to 32.92%, unused land firstly decreased and then increased and the net increase rate is 0.57%, water area and farmland firstly increased and then decreased and their net decrease rate is 0.11% and 0.11%, wetlands continued to increase by 0.07%; The carbon reserves of the study area in 2000, 2010 and 2020 were 24.26×10^8 , 24.29×10^8 , 24.27×10^8 t, showing a trend of first increasing and then

收稿日期: 2023-05-03

修回日期: 2023-05-24

录用日期: 2023-06-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-10-12

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41961039)

第一作者: 刘雅璇 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地生态与区域生态评价研究。E-mail: liuyaxuan@stu.kust.edu.cn

通信作者: 彭秋志 (1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土地生态研究。E-mail: pengqiuzhi@kust.edu.cn

decreasing.(2) Carbon storage reduced 3.19×10^5 t under natural development scenario. Under farmland protection scenario, ecological protection scenario, and farmland ecological joint protection scenario, their carbon sequestration will be respectively 4.29×10^6 , 9.72×10^6 , 9.60×10^6 t. [Conclusion] Reversing the increasing trend of unused land, continuing to steadily implement ecological protection policies with maintaining the cultivated land area, improving the carbon sequestration potential, and helping the Western Sichuan Plateau become an important “carbon sink” area should become the key points of land spatial planning and control on the Western Sichuan Plateau.

Keywords: Western Sichuan Plateau; carbon storage; land use; InVEST model; CA-Markov model

Received: 2023-05-03

Revised: 2023-05-24

Accepted: 2023-06-20

Online(www.cnki.net): 2023-10-12

碳排放可能诱发或加剧大部分地区的气候变化、生物多样性丧失、水土流失、极端天气频发和自然灾害加重等问题^[1]。如何减少碳排放和增加碳储是世界广泛关注的焦点环境问题。2020 年 9 月中国正式宣布将在 2030 年前实现“碳达峰”目标,争取在 2060 年前实现“碳中和”目标。“双碳”目标的提出为我国绿色低碳发展奠定了基础,但要实现这一目标也存在巨大挑战。2021 年 5 月中国科学院学部设立“中国碳中和框架路线图研究”重大咨询项目,提出了从排放端、固碳端以及政策端推动 3 个主要方面构成的碳中和框架路线图,其中固碳端包括了陆地生态系统固碳现状测算及未来固碳潜力分析等专题,指出可通过生态建设、土壤固碳等方式助力“双碳”目标的实现^[2]。

全球每年排放的二氧化碳有 46% 留在大气,而 31% 被陆地吸收^[2],良好的陆地生态系统能吸收大气中的碳,并转化成有机质固定在碳库中,可有效减少大气碳含量^[3],可见陆地生态系统在全球碳平衡体系中发挥着重要作用。不同土地利用类型的固碳能力存在明显差异,因此土地利用变化直接影响陆地生态系统碳储量的变化^[4]。自工业革命以来,高固碳能力土地利用类型的面积趋向减少,削弱了陆地生态系统的固碳潜力。该现象助长了碳排放,有研究^[5]指出,土地利用变化已成为仅次于化石能源燃烧的第 2 大温室气体(主要是二氧化碳)排放源。国土空间规划是调控土地利用变化的关键抓手,因而也是调控陆地生态系统碳库容量的重要手段之一。然而,各地现有国土空间规划仍普遍未纳入碳储量分析内容,不利于衔接“双碳”目标。

陆地生态系统碳储量测算和预测正在成为研究热点。在数据来源层面,实地调查数据、遥感反演数据、专业数据库及相关文献数据等均已成为重要数据源。在内容及方法层面,普遍采用 InVEST 等模型开展区域碳储量测算,而采用的空间演化模型则相对较多,如 FLUS 模型、PLUS 模型及 CA-Markov 模型等。不少学者^[6-8]分别将 PLUS、FLUS 或 CA-

Markov 模型与 InVEST 模型结合,模拟不同地区的碳储量时空格局,并预测了自然推演或未来多情景未来碳储量。在研究区域选择层面,专家学者或侧重关注人类活动影响显著区。巩晟萱等^[9]针对京津冀此类重要城市群的碳储量进行估算和预测,也有学者^[10-12]基于耦合 FLUS 和 InVEST 模型测算和预测了广州市、北京市以及南京市等重要城市的碳储量。除侧重人类活动显著区域外,也有研究倾向于重要生态区域或生态敏感区,如黄河源区^[13]、黑龙江大兴安岭林区^[14]、祁连山国家公园^[15]等。从研究结论看,面向人类活动影响显著区的研究往往得出不利于“双碳”目标实现的结论,而面向生态重要或敏感区的研究则结论各异。总之,随着研究案例的积累和研究热度的保持,该领域已经呈现出不断自我修正、健康发展的局面。为进一步推动该领域研究走向实用化,有必要结合各地实际,促使土地利用碳储量研究成果落实到国土空间规划中,尤其应特别关注那些可能发挥重要固碳作用的区域。

占据四川省西北半壁的川西高原是青藏高原东缘和横断山脉的一部分,该地区草原、森林和湿地资源丰富,自然保护地众多,同时拥有利于碳储存的高海拔冷湿环境,是中国碳密度最高的区域之一^[3],属于我国重要的碳储存区域^[16],具有重要研究价值。目前已有一些文献涉及川西高原碳储量研究,例如,基于实地调查数据分析局部区域草地^[17]、森林^[18]、土壤^[19]的碳储量时空分布特征;基于遥感方法估算局部区域森林的地上碳储量^[20];结合 InVEST 模型和地理探测器分析探讨全区碳储量的时空演化特征及其主要驱动力^[21]。但总体看来,现有研究多针对小范围单一类型生态系统,较少将川西高原作为一个整体加以分析,并且缺乏面向未来的多情景模拟预测分析,对国土空间规划的决策支持作用仍较弱。本文拟结合 InVEST 模型和 CA-Markov 模型,对川西高原 2000—2020 年土地利用变化引起的碳储量变化进行估算和分析,预测不同情景下 2030 年土地利用

变化引起的碳储量变化,探讨土地利用碳储量研究对“双碳”时代国土空间规划的影响,以期为此类区域国土空间规划修编提供基础参考。

1 研究区概况

川西高原(27°35′24″—34°18′36″N,97°18′00″—104°37′12″E)位于四川省西北部(图 1),由四川省甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州组成,占地约 23.34 万 km²。川西高原东西分别连接成都平原和青藏高原,地势由西向东下降,整体分布为西北高、东南低,地势起伏大,具有高原、山地等多种地貌类型,平均海拔在 3 500~4 500 m。受季风影响,川西高原垂直气候明显,分干湿 2 季,主要属于高原山地气候^[22],年平均气温 -4.0~16.0℃,年降水量 400~900 mm。川西高原 2021 年末常住人口约 191.7 万人,人口密度约 8 人/km²。得天独厚的环境条件使得川西高原成为四川省生态发展、旅游文化发展的重要区域。川西高原作为四川省五大经济区之一,因其

重要的生态价值,是五大区域中唯一以生态示范区命名的区域。“十三五”以来,川西北生态示范区以生态优先、绿色发展为导向,并且在“十四五”规划设立了更高水平的生态文明建设、更加优化的国土空间格局等发展目标。“十四五”规划中川西高原致力于构建全域生态文化旅游格局,打造国家级生态文明示范区。同时川西高原作为长江黄河上游重要生态安全屏障,其生态功能重要和生态环境敏感区域面积约占四川省总面积的 33%。陆地生态系统敏感且脆弱,气候变化及人类活动加剧已对其造成严重负面影响。生态环境的破坏及生态保护政策的实施都可能影响生态系统服务功能和生态系统内部的土地利用格局,而区域碳储量及固碳潜力是生态系统服务功能评价的重要指标之一。

因此基于土地利用数据估算和预测川西高原碳储量对研究区域生态环境保护及陆地生态系统的碳收支有着重要的现实意义。

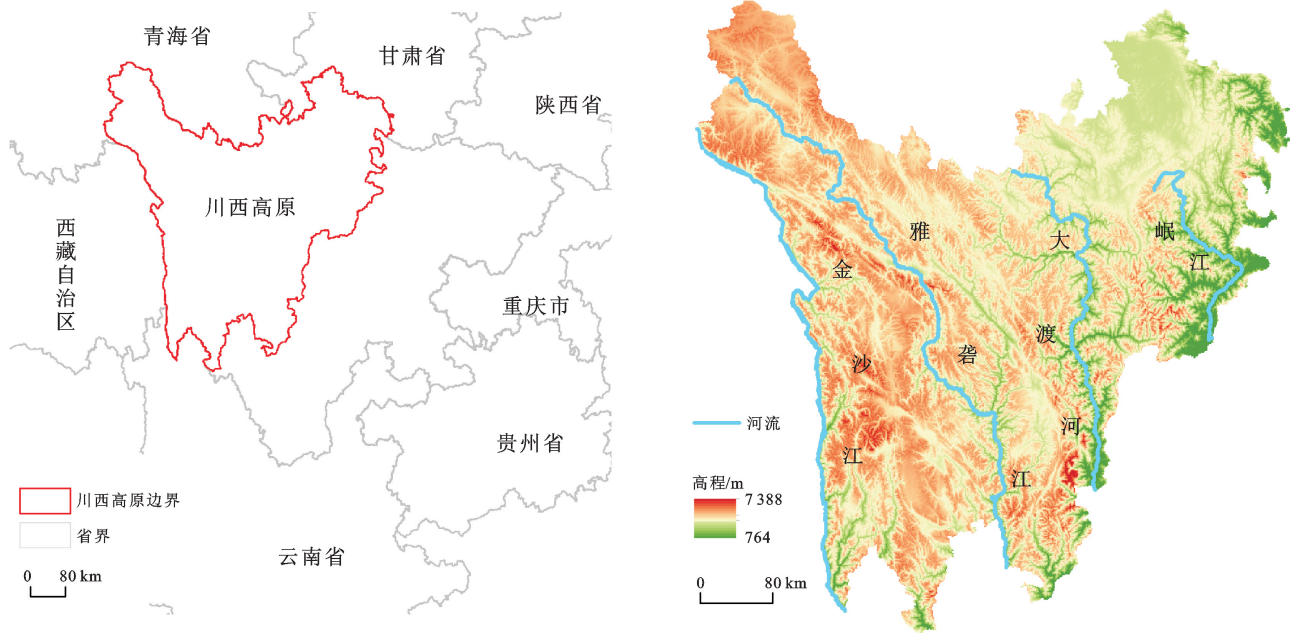


图 1 川西高原区域概况
Fig. 1 Regional overview of the Western Sichuan Plateau

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文的 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据来自武汉大学 YANG 等^[23]发布的 30 m 全国逐年土地覆被数据,该数据集基于 Google Earth Engine(GEE)云计算平台,通过处理 Landsat 影像得到,总体精度约 80%。高程数据为 SRTM DEM 数据,分辨率为 30 m,通过 GEE 云平台下载。坡度数据通过 ArcMap 10.2 软件处理 DEM 得到。气温和降水数据由中国地面气候资料日值数据集 V 3.0 处理生成。河流和道路数据

来自 1 : 100 万全国基础地理信息数据。永久基本农田和自然保护地及水域数据均来自中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所。

2.2 基于 InVEST 模型的碳储量估算

2.2.1 InVEST 碳储量计算模块 InVEST 模型全名生态系统服务和权衡的综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs),主要用于评估各种生态系统服务。本文使用 InVEST 模型中的碳模块计算川西高原碳储量。碳储量计算分为 4 个部分,分别是地上生物碳(C_{above})、

地下生物碳(C_{below})、土壤有机碳(C_{soil})和死亡有机碳(C_{dead})。死亡有机碳数据难以收集且含量较少,本文不作研究。计算公式为:

$$C_{\text{total}(i)} = C_{\text{above}(i)} + C_{\text{below}(i)} + C_{\text{soil}(i)} + C_{\text{dead}(i)} \quad (1)$$

式中: i 为第 i 种地类; $C_{\text{total}(i)}$ 为第 i 种地类的碳储量; C_{total} 为总碳储量(10^8 t)。

2.2.2 碳密度数据采集及其本地化修正 有研究^[24-26]表明,碳密度数据主要受地区年降水量与年平均气温的影响,因此本文借鉴部分文献以及国家青藏高原科学数据中心的碳密度数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/>),对涉及研究区及其附近地区的碳密度数据直接采用,而对全国性碳密度数据进行本地化修正。 C_{above} 分别参考黄玫等^[27]模拟的中国区域植被生物量、YANG 等^[28]测量的青藏高原东南缘森林生物量、李涛^[17]的阿坝牧区草地土壤碳密度研究、陈利军等^[29]的全国尺度的植被净第一生产力遥感监测和吕铭志等^[30]的若尔盖湿地生物量研究; C_{below} 参考黄玫等^[27]、吕铭志等^[30]的研究数据及 ZHANG 等^[31]关于中国西南区域高山植被碳密度研究、薛晶月等^[32]对中国西南地区草地生态系统的碳库研究。 C_{soil} 参考姜广争^[33]的岷江上游区域土壤碳密度研究、YANG 等^[34]的草地碳储量研究、高俊琴等^[35]的若尔盖湿地碳密度研究及刘晓娟等^[36]基于土地利用变化的中国碳储量研究。对黄玫等^[27]、陈利军等^[29]的全国尺度范围的碳密度数据的相关修正公式为:

$$C_{\text{BT}} = 28 \times T + 398 \quad (2)$$

$$C_{\text{BP}} = 6.798e^{0.0054P} \quad (3)$$

$$C_{\text{SP}} = 3.3968 \times P + 3996.1 \quad (4)$$

$$K_{\text{BT}} = \frac{C_{\text{BT1}}}{C_{\text{BT2}}}; K_{\text{BP}} = \frac{C_{\text{BP1}}}{C_{\text{BP2}}} \quad (5)$$

$$K_B = K_{\text{BT}} \cdot K_{\text{BP}} = \frac{C_{\text{BT1}} \cdot C_{\text{BP1}}}{C_{\text{BT2}} \cdot C_{\text{BP2}}} \quad (6)$$

$$K_S = \frac{C_{\text{SP1}}}{C_{\text{SP2}}} \quad (7)$$

式中: T 、 P 分别为年平均气温($^{\circ}\text{C}$)和年平均降水量(mm),代入公式(2)、公式(3)、公式(4)中可得到根据年均温和年均降水计算的生物量碳密度(C_{BT} 、 C_{BP})、根据年降水量计算的土壤碳密度(C_{SP}),表 1 和表 2 分别为川西高原和全国范围,将计算的川西高原和全国范围的生物量碳密度与土壤碳密度代入公式(5)、公式(6)、公式(7)即得到生物量碳密度修正系数(K_B)和土壤碳密度修正系数(K_S)。经修正后的川西高原土地利用碳密度结果见表 1。

表 1 修正后的不同土地利用类型碳密度

Table 1 Corrected carbon density of different land use types

t/hm ²			
土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度
耕地	11.0	2.2	39.3
林地	22.8	12.0	83.5
草地	2.8	0.2	92.5
水域	6.6	0	0
湿地	1.3	2.9	123.1
建设用地	5.5	0	45.5
未利用地	2.9	0	17.5

2.3 CA—Markov 模型预测土地利用变化

2.3.1 CA—Markov 模型 CA—Markov 模型(元胞自动机—马尔可夫模型)是 CA 和 Markov 模型的结合。CA 是一种时间、空间、状态都离散的动力学模型,可模拟复杂系统的时空演化过程。Markov 链是以马尔可夫随机过程为理论基础的预测方法^[37],广泛用于土地利用变化模拟及预测,且预测结果精度较高。CA 和 Markov 模型以过渡矩阵为基础,并考虑空间结构与周围状态影响得到土地利用类型预测结果。本文土地利用预测由 IDRISI 17.0 软件完成,且需要至少 3 个不同时期的土地利用影像,步骤可概述为 4 步:(1)将 2000 年与 2010 年土地利用影像放入 Markov 模型得到 Markov 转移矩阵,预测 2020 年影像进行精度验证,经 Cross Tab 模块验证精度在 90%以上;(2)依据不同情景制作各地类适宜性图集;(3)利用 2010 年和 2020 年土地利用数据制作不同情景下 Markov 转移概率矩阵,并根据转移概率矩阵修改 Markov 转移面积矩阵;(4)将 2020 年土地利用影像、适宜性图集以及 Markov 转移面积矩阵导入 CA—Markov 模型,根据预测年份的间隔设置迭代次数为 10,默认 CA 过滤器类型为标准 5×5 邻域过滤器,预测 2030 年土地利用。

2.3.2 2020—2030 年土地利用变化情景设定 情景 1 为自然发展情景(natural development scenario)。依据土地利用自然演化趋势模拟 2030 年土地利用,在 CA—Markov 模块中设置 2020 年土地利用为基础图像,加入各地类适宜性图集;直接使用 2010—2020 年 Markov 转移概率矩阵(表 2)作为 2020—2030 年 Markov 转移概率矩阵。

情景 2 为耕地保护情景(cultivated land protection scenario)。限制永久基本农田的转出(适宜性取值在限制转出区域为 0,其余为 1,下同);将耕地转为其他地类的概率分别乘以系数 0.9(表 3)。

情景 3 为生态保护情景(ecological protection scenario)。限制永久基本农田、自然保护地及水域的转出,将林地、草地、湿地转移为其他地类的概率分别

乘以系数 0.9(表 4)。

情景 4 为耕地生态联合保护情景(scenario of protecting cultivated land and ecology)。限制永久基本农田、自然保护地及水域的转出,耕地、林地、草地和湿地转为其他地类的概率分别乘以系数 0.9;未利用地转移为未利用地的概率乘以系数 0.7,由此降低的概率按概率比例加大未利用地转出为耕地、林地和草地的概率(表 5)。

表 2 2020—2030 年自然发展情景下 Markov 转移概率矩阵

Table 2 Markov transition probability matrix from 2020 to 2030 under Natural Development Scenario

土地利用类型	自然发展情景(情景 1)						
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
耕地	0.622 5	0.142 1	0.228 0	0.000 3	0.000 3	0.001 5	0
林地	0.006 9	0.939 6	0.055 6	0	0	0	0
草地	0.006 8	0.094 6	0.822 2	0.007 2	0.015 6	0	0.079 7
水域	0.000 1	0.002 6	0.139 9	0.538 0	0	0.000 2	0.319 2
湿地	0.000 3	0.004 9	0.207 1	0.003 0	0.693 7	0	0
建设用地	0.000 1	0	0.002 1	0.064 4	0	0.933 4	0
未利用地	0	0.000 6	0.179 5	0.110 0	0	0	0.709 9

表 3 2020—2030 年耕地保护情景下 Markov 转移概率矩阵

Table 3 Markov transition probability matrix from 2020 to 2030 under Cultivated Land Protection Scenario

土地利用类型	耕地保护情景(情景 2)						
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
耕地	0.660 3	0.127 9	0.205 2	0.005 0	0.000 3	0.001 4	0
林地	0.006 9	0.937 5	0.055 6	0	0	0	0
草地	0.006 8	0.094 6	0.796 2	0.007 2	0.015 6	0	0.079 6
水域	0.000 1	0.002 6	0.139 8	0.538 0	0	0.000 2	0.319 3
湿地	0.000 4	0.007 1	0.295 7	0.003 0	0.693 8	0	0
建设用地	0.000 1	0	0.002 1	0.064 4	0	0.933 4	0
未利用地	0.213 0	0.000 7	0.179 4	0.110 0	0	0	0.496 9

表 4 2020—2030 年生态保护情景下 Markov 转移概率矩阵

Table 4 Markov transition probability matrix from 2020 to 2030 under Ecological Protection Scenario

土地利用类型	生态保护情景(情景 3)						
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
耕地	0.622 5	0.142 1	0.228 0	0.005 6	0.000 3	0.001 5	0
林地	0.006 2	0.943 8	0.050 0	0	0	0	0
草地	0.006 1	0.085 1	0.816 6	0.006 5	0.014 0	0	0.071 6
水域	0.000 1	0.002 6	0.139 8	0.538 0	0	0.000 2	0.319 3
湿地	0.000 4	0.006 4	0.266 1	0.002 7	0.724 4	0	0
建设用地	0.000 1	0	0.002 1	0.064 4	0	0.933 4	0
未利用地	0	0.001 5	0.391 5	0.110 0	0	0	0.496 9

表 5 2020—2030 年耕地生态联合保护情景下 Markov 转移概率矩阵

Table 5 Markov transition probability matrix from 2020 to 2030 under Scenario of Protecting Cultivated Land and Ecology

土地利用类型	耕地生态联合保护情景(情景 4)						
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
耕地	0.660 3	0.127 9	0.205 2	0.005 0	0.000 3	0.001 4	0
林地	0.006 2	0.943 8	0.050 0	0	0	0	0
草地	0.006 1	0.085 1	0.816 6	0.006 5	0.014 0	0	0.071 6
水域	0.000 1	0.002 6	0.139 8	0.538 0	0	0.000 2	0.319 3
湿地	0.000 4	0.006 4	0.266 1	0.002 7	0.724 4	0	0
建设用地	0.000 1	0	0.002 1	0.064 4	0	0.933 4	0
未利用地	0	0.001 5	0.391 5	0.110 0	0	0	0.496 9

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年土地利用变化及碳储量估算

草地和林地作为川西高原最主要的 2 种地类,合计面积始终超过全区总面积的 96.00%。草地一直是川西高原分布最广的地类,在 2000 年时拥有 152 188 km²的总面积(表 6),占全区总面积的 65.20%,但这 20 年草地逐渐减少,共减少约 3 629 km²,相当于全区总面积的 1.55%。减少的草地大部分转为林地和未利用地,说明川西高原的草地同时存在森林化和裸地化趋势。2000—2010 年间草地转为林地的面积约为草地转为未利用地面积的 3.5 倍(表 6),而 2010—2020 年该比率大幅缩小到 1.2 倍(表 7),说明草地退化为裸地的问题日益突出。林地始终保持着川西高

原分布第 2 广地类的地位,林地面积占全区总面积的比重从 2000 年的 31.73%(74 053 km²)不断增加到 2020 年的 32.92%(76 848 km²),其中 2000—2010 年增加 0.78%(1 810 km²),2010—2020 年增加 0.42%(985 km²),增长趋势先快后慢。

其他地类在 2000—2020 年的变化各有特点:未利用地变化趋势为先减后增,20 年共增加 1 322 km²,新增部分主要来源为草地和水域;水域面积先增后减,20 年减少约 262 km²,减少部分主要流向草地和未利用地;耕地面积不断减少,减少量约 251 km²,主要是转移为林地和草地;湿地面积先减后增,总趋势为增加,主要来源地类为草地;建设用地占比一直<0.01%,对相关计算影响微弱,故不做分析。

表 6 2000—2010 年川西高原土地利用转移矩阵

Table 6 Land use transfer matrix of Western Sichuan Plateau from 2000 to 2010

km²

2000 年	2010 年							总计
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	
耕地	1 007.7	92.6	200.4	4.6	0.6	7.55	0	1 313.4
林地	182.2	73 280.8	589.5	0.3	0.1	0.3	0	74 053.2
草地	126.3	2 481.2	148 458.6	381.4	44.4	1.5	695.1	152 188.5
水域	0.2	6.0	68.7	1919.2	0.0	1.3	205.9	2 201.3
湿地	2.9	2.7	263.5	0.1	146.4	0.0	0	415.6
建设用地	0	0	0	1.1	0	8.4	0	9.5
未利用地	0	0.3	665.8	397	0	0.2	2 163.3	3 226.6
总计	1 319.3	75 863.6	150 246.5	2 703.7	191.5	19.3	3 064.3	233 408.2

表 7 2010—2020 年川西高原土地利用转移矩阵

Table 7 Land use transfer matrix of Western Sichuan Plateau from 2010 to 2020

km²

2010 年	2020 年							总计
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	
耕地	821.3	187.4	300.8	7.4	0.4	2	0.4	1 319.3
林地	111.1	74 856.9	895.3	0.2	0	0	0	75 863.6
草地	129.5	1 793.6	146 378.6	137.3	296.6	0.4	1 510.4	150 246.5
水域	0.4	7.0	378.2	1 454.4	0.0	0.5	863.2	2 703.7
湿地	0.1	1.4	56.7	0.6	132.9	0	0	191.5
建设用地	0	0	0	1.2	0	17.8	0	19.3
未利用地	0.1	1.8	549.8	337.2	0	0.1	2 175.2	3 064.3
总计	1 062.5	76 848.1	148 559.4	1938.3	429.9	20.8	4 549.2	233 408.2

借助 InVEST 模型碳储量模块根据碳密度表格和土地利用数据计算出川西高原 2000 年、2010 年、2020 年碳储量分别约 24.26×10^8 , 24.29×10^8 , 24.27×10^8 t, 碳储量先增 2.39×10^6 t, 发挥“碳汇”作用, 后 10 年损失 1.75×10^6 t, 转为“碳源”角色。川西高原 2000—2020 年全域及局部区域的碳密度分布见图 2 和图 3。从全域整体看, 碳密度分布格局变化不明显; 但基于局部区域可以看出 2000—2020 年低碳密度区域从分布较松散到合并成大片区域, 低碳密度区域不断扩张, 侵占周边的较高和高碳密度区域。结

合前述土地利用变化特征来看, 草地收缩、未利用地不断增多、林地面积增长速率变缓所导致的低碳密度地类扩张和高碳密度地类缩减现象, 可能是川西高原 2000—2020 年碳储量变化的主要原因。

3.2 2020—2030 年多情景下土地利用变化及碳储量预测

不同情景下的土地利用预测结果存在差异。与 2020 年实际土地利用情况相比, 耕地在情景 1、情景 3 和情景 4 下面积分别减少 164.5, 148.8, 126.7 km², 在情景 2 下面积增加 843.6 km²。林地在 4 种情景下

的面积相对于 2020 年均增加。草地在情景 1 和情景 2 下面积分别减少 1 116.7,1 139.0 km²,在情景 3 和情景 4 下面积小幅增加(70.6,57.0 km²)。水域在 4 种情景下均减少且减少幅度相当。湿地在 4 种情景下均扩张。未利用地在情景 1 下面积扩张 675.2 km²,在情景 2、情景 3、情景 4 下面积缩减,情景 3 和情景 4 下的面积缩减量大于情景 2。草地在情景 1 和情景 2 下大幅缩减,在情景 3 和情景 4 下小幅扩张。情景 2、情景 3、情景 4 都有效抑制了未利用地的扩张。

分别对 2020 年土地利用与 2030 年多情景下的土地利用做转移矩阵分析(表 8~表 11),相比于情景

1、情景 3、情景 4,耕地转为林地和草地的面积在情景 2 下较少,分别为 101.0,93.6 km²,4 种情景下林地的转出地类主要为草地,情景 3 和情景 4 下的转移面积(845.8,845.6 km²)小于情景 1 和情景 2 下的转移面积(924.9,923.5 km²)。草地转出面积最多的地类为林地,情景 3 和情景 4 下的转移量小于情景 1 和情景 2 下的转移量;其次为未利用地,情景 1 和情景 2 下的转移面积(602.2,493.6 km²)远高于情景 3 和情景 4 的转移量(102.2,102.2 km²)。水域主要转移为草地和未利用地。未利用地的转出地类主要为草地,在情景 3 和情景 4 下的转移量相比于情景 1 和情景 2 大幅增加。

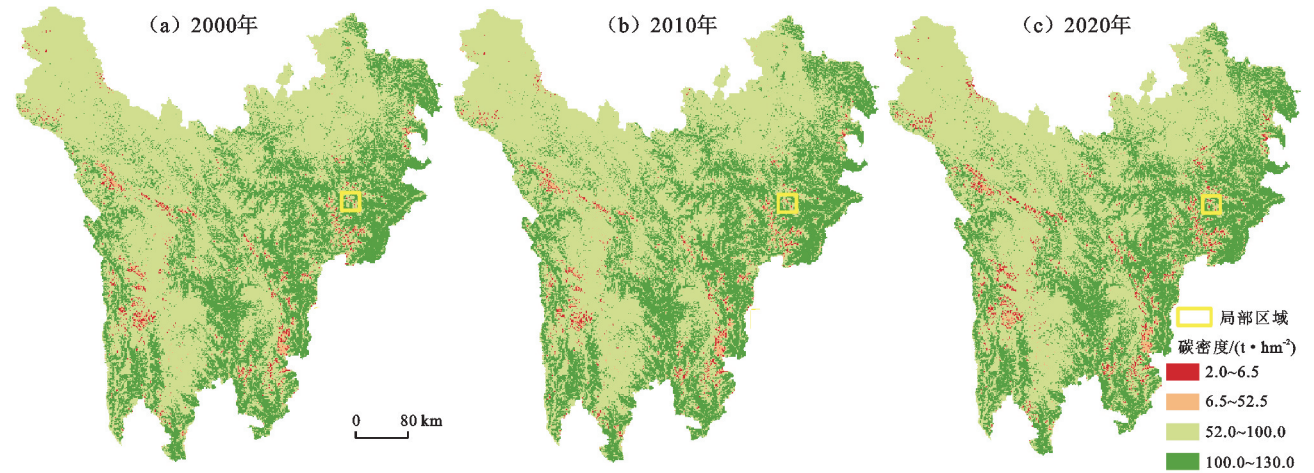


图 2 2000 年、2010 年、2020 年的碳密度分布

Fig. 2 Carbon density distribution in 2000, 2010 and 2020

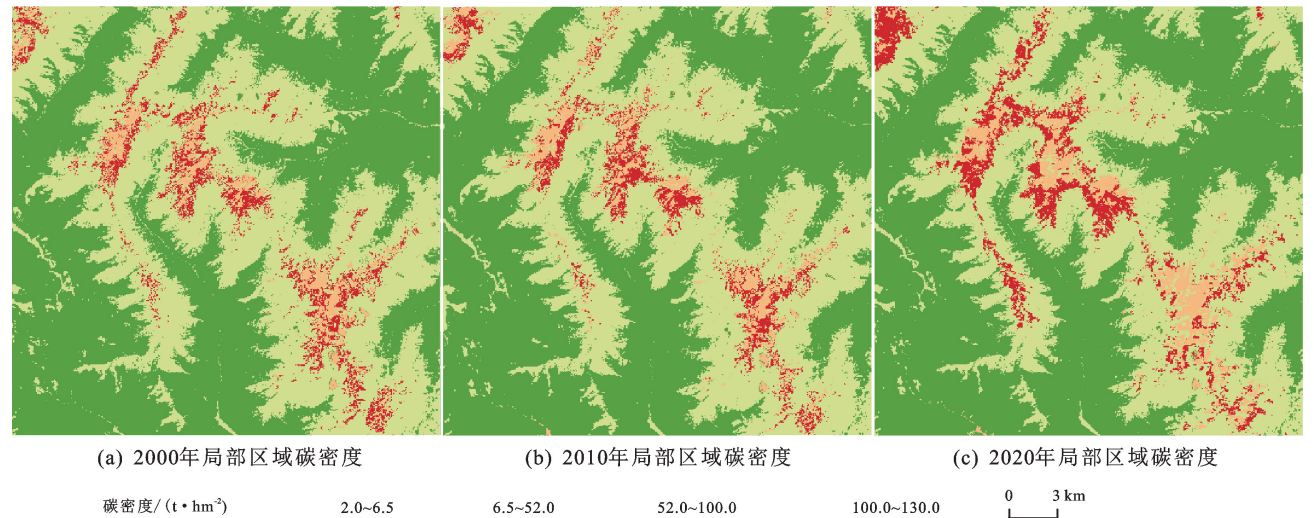


图 3 2000 年、2010 年、2020 年局部区域碳密度

Fig. 3 Local regional carbon density in 2000, 2010 and 2020

由图 4 可知,4 种情景下 2030 年碳储量依次为 24.27×10⁸,24.31×10⁸,24.37×10⁸,24.37×10⁸ t。与 2020 年实际碳储量对比,川西高原在 4 种情景下碳储量变化情况分别为减少 3.19×10⁵ t、增加 4.29×

10⁶ t、增加 9.72×10⁶ t、增加 9.60×10⁶ t。情景 1 下川西高原为“碳源”,将损失碳储量 3.19×10⁵ t,其余情景下川西高原均为“碳汇”,区域生态系统发挥出固碳作用。

表 8 自然发展情景(情景 1)下 2020—2030 年川西高原土地利用转移矩阵

Table 8 Land use transfer matrix of Western Sichuan Plateau under Natural Development Scenario from 2020 to 2023 km²

2010 年	2020 年							
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	总计
耕地	797.1	111.5	148.5	3.6	0.4	1.5	0	1 062.5
林地	67.2	75 854.9	924.9	0	1.1	0	0	76 848.1
草地	33.6	1 598.2	146 172.1	12.1	140.8	0.4	602.2	148 559.4
水域	0.1	7.6	127.3	1 641.8	0.1	0.1	161.4	1938.3
湿地	0	1.3	1.8	0.3	426.5	0	0	429.9
建设用地	0	0	0.3	0.8	0	19.7	0	20.8
未利用地	0	2.2	67.5	18.5	0	0.1	4 460.6	4 549.2
总计	898.0	77 575.7	147 442.3	1 677.1	568.9	21.8	5 224.2	233 408.2

表 9 耕地保护情景(情景 2)下 2020—2030 年川西高原土地利用转移矩阵

Table 9 Land use transfer matrix of Western Sichuan Plateau under Cultivated Land Protection Scenario from 2020 to 2023 km²

2010 年	2020 年							
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	总计
耕地	866.3	101.0	93.6	0.5	0.3	1.3	0	1 062.5
林地	75.7	75 847.8	923.5	0	1.1	0	0	76 848.1
草地	120.5	1 601.3	146 192.2	11.5	140.2	0.1	493.6	148 559.4
水域	17.1	7.7	128.7	1 642.5	0.1	0	142.1	1938.3
湿地	0	1.3	1.8	0.3	426.5	0	0	429.9
建设用地	0	0	0.2	0.8	0	19.7	0	20.8
未利用地	827.0	2.7	80.2	19.9	0	0	3 619.1	4 549.2
总计	1 906.6	77 561.8	147 420.2	1 675.5	568.2	21.1	4 254.8	233 408.2

表 10 生态保护情景(情景 3)下 2020—2030 年川西高原土地利用转移矩阵

Table 10 Land use transfer matrix of Western Sichuan Plateau under Ecological Protection Scenario from 2020 to 2030 km²

2010 年	2020 年							
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	总计
耕地	813.6	104.8	139.1	3.3	0.4	1.4	0	1 062.5
林地	66.1	75 935.4	845.8	0	0.8	0	0	76 848.1
草地	33.9	1 453.2	146 832.0	11.3	126.9	0.1	102.2	148 559.4
水域	0.2	7.5	168.7	1 629.0	0.1	0.0	132.9	1 938.3
湿地	0	1.3	2.1	0.2	426.3	0	0	429.9
建设用地	0	0	0.2	0.8	0	19.7	0	20.8
未利用地	0	6.5	641.7	18.4	0	0	3 882.3	4 549.2
总计	913.8	77 508.7	148 629.6	1 663.0	554.5	21.2	4 117.4	233 408.2

表 11 耕地生态联合保护情景(情景 4)下 2020—2030 年川西高原土地利用转移矩阵

Table 11 Land use transfer matrix of Western Sichuan Plateau under Scenario of Protecting Cultivated land and Ecology from 2020 to 2023 km²

2010 年	2020 年							
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	总计
耕地	828.6	99.9	129.6	3.0	0.3	1.3	0	1 062.5
林地	70.0	75 931.7	845.6	0	0.8	0	0	76 848.1
草地	37.2	1 453.4	146 828.4	11.3	126.9	0.1	102.2	148 559.4
水域	0.2	7.5	168.7	1 629.0	0.1	0	132.9	1 938.3
湿地	0	1.3	2.1	0.2	426.3	0.0	0	429.9
建设用地	0	0.0	0.2	0.8	0	19.7	0	20.8
未利用地	0	6.5	641.7	18.4	0	0	3 882.3	4 549.2
总计	936.0	77 500.3	148 616.3	1 662.7	554.4	21.1	4 117.4	233 408.2

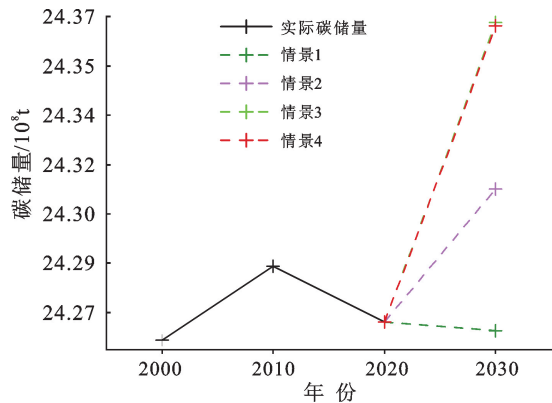


图 4 2000 年、2010 年、2020 年和 2030 年不同情景下碳储量
Fig. 4 Carbon storage changes in 2000,2010,2020 and 2030

3.3 2000—2030 年多情景下土地碳密度变化预测

从川西高原全域看,2030 年碳密度整体空间分布格局变化仍不明显,与 2000—2020 年碳密度分布格局相似(图 2)。

从局部区域(图 5)看,在情景 1 下的低碳密度区域较其余 3 种情景更大,且分布更集中。情景 2 下低碳密度区域分布较松散,分布范围相对于情景 3 和情景 4 更广。将碳密度变化情况分为不变、增加、减少 3 种。表 12 中 4 种情景下的碳密度变化情况主要以不变为主,占比均在 94.00% 以上。碳密度减少面积占比最多的是情景 1。

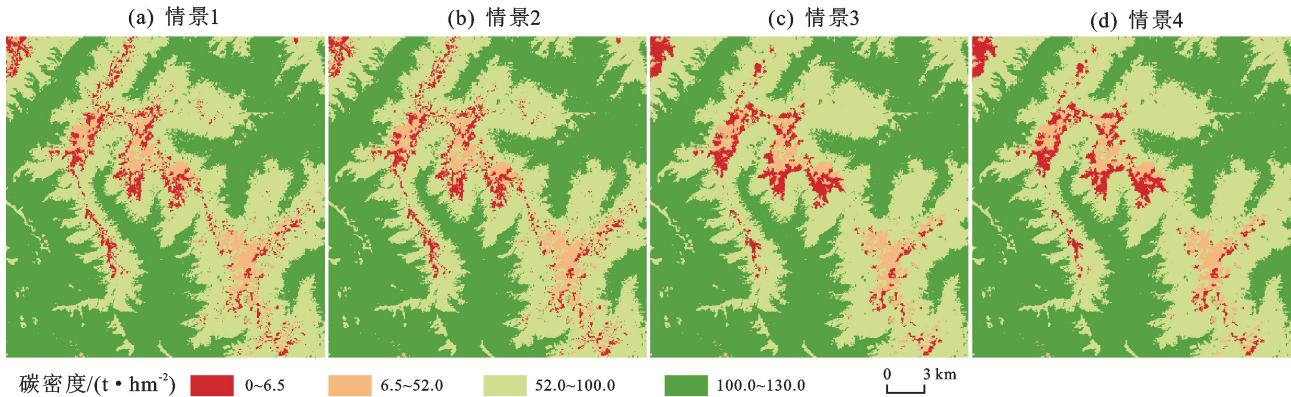


图 5 局部区域在 4 种情景下的碳密度分布

Fig. 5 Carbon density distribution in local area under four scenarios

表 12 4 种情景下 2000—2030 年碳密度变化情况

Table 12 Changes of carbon density under four scenarios from 2000 to 2030					%
2000—2030	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	
增加占比	3.04	3.26	3.15	3.15	
不变占比	94.78	94.63	95.04	95.03	
减少占比	2.18	2.11	1.81	1.82	

统计 2000—2030 年川西高原各县域碳密度减少的面积占比情况,并列举出前 10 的县(表 13),4 种情

景下碳密度减少较多的区域主要集中分布在理县、小金县、德格县、巴塘县等位于川西高原边界范围(图 6)。理县等川西高原东缘的县碳密度减少可能是由于靠近成都平原,人类活动较多;西部的德格县等碳密度变化可能受到青藏高原区域生态系统及高程坡度的影响。

综合来看,情景 1 和情景 2 的碳密度减少幅度最大,其次是情景 4,情景 3 的碳密度减少幅度最小。碳密度值增加的区域在空间格局上呈均匀分布,无明显特征。

表 13 2000—2030 年川西高原以县域为单位碳密度减少占比前 10 的县

Table 13 The top 10 counties of decreased carbon density in the Western Sichuan Plateau from 2000 to 2030											%
情景	碳密度减少占比										
1	县名	理县	小金县	汶川县	泸定县	康定市	德格县	巴塘县	九龙县	丹巴县	黑水县
	占比	4.57	4.42	3.70	3.69	3.62	3.34	3.29	2.92	2.68	2.53
2	县名	理县	小金县	泸定县	汶川县	康定市	德格县	九龙县	黑水县	丹巴县	甘孜县
	占比	4.46	4.33	3.89	3.77	3.43	3.17	2.87	2.68	2.48	2.20
3	县名	小金县	泸定县	汶川县	理县	康定市	德格县	巴塘县	九龙县	黑水县	丹巴县
	占比	3.61	3.60	3.46	3.40	2.78	2.74	2.49	2.46	2.28	2.10
4	县名	泸定县	小金县	汶川县	理县	康定市	德格县	巴塘县	九龙县	黑水县	丹巴县
	占比	3.66	3.61	3.49	3.41	2.78	2.74	2.49	2.48	2.29	2.11

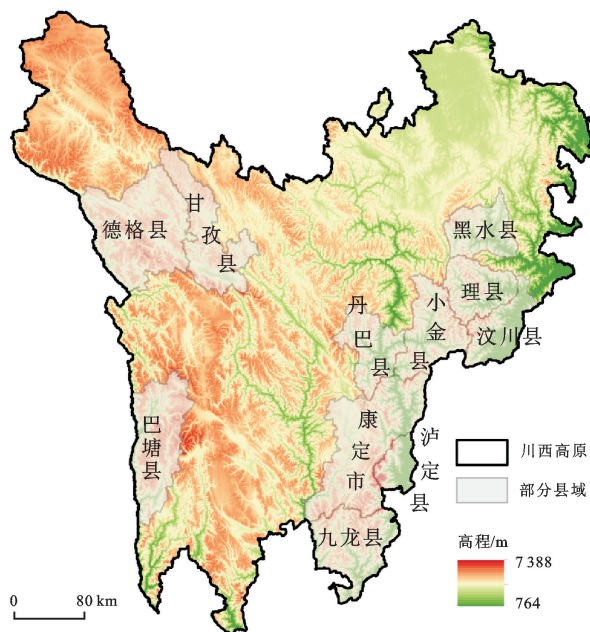


图 6 碳密度减少占比前 10 的县空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of top ten counties with carbon density reduction

4 讨论

推动各类规划衔接“双碳”目标是“双碳”时代规划工作的应有之义。中国在经过长时间的“多规合一”探索后,将主体功能区规划、土地利用规划、城乡规划等空间规划统合到了国土空间规划框架下。“双碳”目标的提出时间(2020 年 9 月)晚于国土空间规划体系的建立时间(2019 年 5 月),加之土地利用碳储量调查研究体系尚不成熟,导致许多地方在组织编制新一轮国土空间规划时,未将土地利用碳储量分析预测纳入前期研究内容。为实现对“双碳”目标的有效衔接,在未来的国土空间规划修编过程中,有必要出台相关规程指南,促使各地补齐该项分析。

本研究从土地利用变化及转移角度多情景地分析并预测生态系统碳储量,可为未来川西高原优化国土空间格局提供一定参考。本研究表明,2000—2020 年川西高原碳储量变化为先增后减,2030 年自然发展情景下川西高原碳储量减少,沦为“碳源”,而其余情景下碳储量均增加,转变为“碳汇”。导致该区域在自然发展情景下沦为“碳源”的主要直接原因是草地向裸地的退化,更深层的原因是气候变化和人类活动导致的局部草原沙化。鉴于川西高原在国家陆地生态系统碳库中的特殊重要性,因此在设立该区域国土空间规划目标时,应当确保区域整体碳储量得到维持或增长,而非放任其减少。为此,该区域应继续加强对森林、草原、湿地等高碳密度生态系统的保护修复;对于自然生态系统发生退化的局部区域应及时施行人工干预,推动农牧业向生态友好转型,在经济技术

可行的前提下科学开展生态恢复,努力扭转未利用地增多的趋势。

耕地作为粮食生产的主要依托,虽然研究区的耕地因水热条件限制而产能不高,但从保障国家粮食安全角度出发,要求该区域保有一定数量相对优质的耕地仍然具有重要意义。在耕地保护情景下,预测 2030 年川西高原将在 2020 年基础上新增固碳 4.29×10^6 t,表明加强耕地保护仍能发挥一定“碳汇”作用。当然,生态优先仍应是这一区域国土空间规划的主基调,不宜把生态保护和耕地保护对立起来,而应实现二者兼顾协同。在结合耕地保护和生态保护的情景下,预测 2030 年川西高原碳储量增加 9.60×10^6 t,是单纯耕地保护情景下的 2 倍多,与单纯生态保护情景下新增固碳量 9.72×10^6 t 十分接近,说明耕地与生态兼顾协同的方案是可行的。该情景设置或可为川西高原这类生态敏感脆弱区域未来情景设置提供思路借鉴。

川西高原幅员辽阔,除实施重点区域的环境保护政策外,对于碳密度可能下降的区域,需要重点关注理县等下降面积占比较大的县,将川西高原生态保护措施进一步细化推进到各县。碳密度减少的县多位于川西高原东部,根据已有关于城市碳储量研究^[10-12]可分析这部分县碳密度下降可能由人类活动引起。人类活动较为频繁区域的面积占比虽小,却也依然影响着陆地生态系统总碳储量,因此有必要定期监测与核算生态系统碳储量,以县域为单位实施精准的生态环境保护政策,推进低碳土地利用结构优化措施。

大部分基于土地利用的碳储量研究通过文献调查获得碳密度数据,本文碳密度数据来自国家青藏高原科学数据中心的碳密度数据集,并通过文献核实,全国尺度的碳密度经过降水和气温模型进行修正,具有一定可靠性,文中 2000—2020 年碳储量变化趋势也与 XIANG 等^[21]的研究成果相符。诚然,由于缺乏高空间密度、高时效性和统一标准的碳密度调查数据,而不同文献所给出的数据常存在较大差异,所以本文所得出的川西高原土地利用碳密度也仅具相对参考价值。另外,相同土地利用类型的不同地块间也存在明显的碳密度差异,它对区域碳储量估算精度也有很大影响,这是未来研究应着重发力的关键方向。

5 结论

(1)草地作为川西高原分布最广的地类,20 年草地呈减少趋势。林地在 2000—2010 年增加 $1\,810\text{ km}^2$,2010—2020 年增加幅度变小(985 km^2)。未利用地变化趋势为先减后增,增加面积约 $1\,322\text{ km}^2$ 。水域和耕地面积同为先增后减,20 年分别减少 263,

251 km²。草地主要转移为林地和未利用地,这与川西高原地区林草地类转化现象以及草地退化等环境问题相关。耕地面积的减少主要得益于“退耕还林还草”生态保护政策的有效实施。2000—2020年川西高原碳储量分别 24.26×10^8 , 24.29×10^8 , 24.27×10^8 t,碳储量变化趋势为先增后减,未利用地的大面积扩张以及林地萎靡的面积增长速率的减缓可能是2010—2020年碳储量减少的主要原因。

(2)相比于情景1(自然发展情景),情景2(耕地保护情景)、情景3(生态保护情景)、情景4(耕地生态联合保护情景)下的土地利用变化情况各有所优化。情景2、情景3和情景4下未利用地的扩张趋势受到抑制,情景3和情景4下草地缩减幅度下降。4种情景下2030年碳储量依次为 24.27×10^8 , 24.31×10^8 , 24.37×10^8 , 24.37×10^8 t。情景1下的碳储量相比于2020年将损失 3.19×10^5 t;其余情景下碳储量均增加,其中情景3和情景4下碳储量增加量比情景2多,这与川西高原林地、草地扩张,未利用地缩减有关。情景3下固碳量最多,情景4表明了在耕地保护和生态保护结合的有效可行性。未来川西高原需重点关注有效抑制草地退化和未利用地扩张、耕地保护和生态用地保护政策方面,以更加优化国土空间保护和开发格局、提高陆地生态系统碳储量和固碳潜力。

参考文献:

- [1] 方精云,黄耀,朱江玲,等.森林生态系统碳收支及其影响机制[J].中国基础科学,2015,17(3):20-25.
FANG J Y, HUANG Y, ZHU J L, et al. Carbon budget of forest ecosystems and its driving forces[J]. China Basic Science, 2015, 17(3): 20-25.
- [2] 丁仲礼.中国碳中和框架路线图研究[J].中国工业和信息化,2021,37(8):54-61.
DING Z L. Research on China's carbon neutral framework roadmap[J]. China Industry and Information Technology, 2021, 37(8): 54-61.
- [3] 李若玮,叶冲冲,王毅,等.基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J].草地学报,2021,29(增刊1):43-51.
LI R W, YE C C, WANG Y, et al. Carbon storage estimation and its driving force analysis based on InVEST model in the Tibetan Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(S1): 43-51.
- [4] 陈耀亮,罗格平,叶辉,等.1975—2005年中亚土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响[J].自然资源学报,2015,30(3):397-408.
CHEN Y L, LUO G P, YE H, et al. Sources and sinks of carbon caused by forest land use change from 1975 to 2005 in Central Asia[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 397-408.
- [5] 曲福田,卢娜,冯淑怡.土地利用变化对碳排放的影响[J].中国人口·资源与环境,2011,21(10):76-83.
QU F T, LU N, FENG S Y. Effects of land use change on carbon emissions[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(10): 76-83.
- [6] 王超越,郭先华,郭莉,等.基于 FLUS-InVEST 的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响:以呼包鄂榆城市群为例[J].生态环境学报,2022,31(8):1667-1679.
WANG C Y, GUO X H, GUO L, et al. Land use change and its impact on carbon storage in northwest China based on FLUS-Invest: A case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(8): 1667-1679.
- [7] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省委储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
SUN F H, FANG F M, HONG W L, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST models[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 151-158.
- [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] 巩晟萱,张玉虎,李宇航.基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测[J].干旱区资源与环境,2023,37(6):20-28.
GONG S X, ZHANG Y H, LI Y H. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei Region: A PLUS-InVEST model approach[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(6): 20-28.
- [10] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229.
ZHU Z Q, MA X S, HU H. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou City by coupling FLUS-InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 222-229.
- [11] 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 Z, CHEN R, ZHAO J, et al. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [12] 孙欣欣,薛建辉,董丽娜.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J].生态与农村环境学报,2023,39(1):41-51.

- SUN X X, XUE J H, DONG L N. Spatio-temporal change and prediction of carbon storage in Nanjing based on PLUS model and InVEST model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(1): 41-51.
- [13] 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. *环境科学*, 2022, 43(11): 5253-5262.
- HOU J K, CHEN J J, ZHANG K Q, et al. Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5253-5262.
- [14] 陈科屹, 王建军, 何友均, 等. 黑龙江大兴安岭重点国有林区森林碳储量及固碳潜力评估[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1725-1734.
- CHEN K Y, WANG J J, HE J Y, et al. Estimations of forest carbon storage and carbon sequestration potential of key state-owned forest region in Daxing'anling, Heilongjiang Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9): 1725-1734.
- [15] 邓喆, 丁文广, 蒲晓婷, 等. 基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 324-334.
- DENG Z, DING W G, PU X T, et al. Spatio-temporal change and prediction of carbon storage in Qilian Mountain National Park based on InVEST model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 324-334.
- [16] TANG X, ZHAO X, BAI Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [17] 李涛. 阿坝牧区不同利用方式与程度草地土壤与植被碳储量研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013.
- LI T. Research on soil and vegetation carbon storage of grassland under different land use and degree in Aba pastoral areas[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [18] 吴胜义, 王飞, 徐干君, 等. 川西北高山峡谷区森林碳储量及空间分布研究: 以四川洛须自然保护区为例[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1735-1744.
- WU S Y, WANG F, XU G J, et al. Study on forest carbon storage and spatial distribution in the alpine gorge region of northwest Sichuan: Take Sichuan Luoxu Nature Reserve as an example[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(9): 1735-1744.
- [19] 陈良帅, 黄新亚, 薛丹, 等. 川西高原泥炭沼泽土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(2): 267-275.
- CHEN L S, HUANG X Y, XUE D, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in peat swamp of Western Sichuan Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(2): 267-275.
- [20] 巫明焱, 董光, 王艺积, 等. 川西米亚罗自然保护区森林地上碳储量遥感估算[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 621-628.
- WU M Y, DONG G, WANG Y J, et al. Estimation of forest aboveground carbon storage in Sichuan Miyaluo Nature Reserve based on remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 621-628.
- [21] XIANG M S, WANG C J, TAN Y X, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Western Sichuan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): e8114.
- [22] 王庆莉, 王茹琳, 张利平, 等. 基于 MaxEnt 模型的川西高原松茸气候生态适宜性与潜在分布[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2525-2533.
- WANG Q L, WANG R L, ZHANG L P, et al. Climatic ecological suitability and potential distribution of *Tricholoma matsutake* in western Sichuan Plateau, China based on MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2525-2533.
- [23] YANG J, HUANG X. 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.
- [24] 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 Environments*, 2013, 89: 67-76.
- [25] RAICH J W, NADELHOFFER K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends[J]. *Ekologia Bratislava*, 1989, 70(5): 1346-1354.
- [26] GIAEDINA 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.
- [27] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4156-4163.
- HUANG M, JI J J, CAO M K, et al. Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [28] YANG Y, WANG G X, SHEN H H, et al. Dynamics of carbon and nitrogen accumulation and C : N stoichiometry in a deciduous broadleaf forest of deglaciated terrain in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 312: 10-18.
- [29] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J]. *遥感学报*, 2002, 6(2): 129-135.
- CHEN L J, LIU G H, LI H G. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*,

- 2002,6(2):129-135.
- [30] 吕铭志,盛连喜,张立.中国典型湿地生态系统碳汇功能比较[J].湿地科学,2013,11(1):114-120.
LÜ M Z, SHENG L X, ZHANG L. A review on carbon fluxes for typical wetlands in different climates of China[J].Wetland Science,2013,11(1):114-120.
- [31] ZHANG Y B, DUAN B L, LI C Y, et al. Links between plant diversity, carbon stocks and environmental factors along a successional gradient in a subalpine coniferous forest in Southwest China[J].Forest Ecology and Management,2011,262(3):361-369.
- [32] 薛晶月,王丽华,谢雨,等.西南地区草地群落灌木植物盖度对生态系统碳库的影响[J].植物生态学报,2019,43(4):365-373.
XUE J Y, WANG L H, XIE Y, et al. Effect of shrub coverage on grassland ecosystem carbon pool in southwestern China[J].Journal of Plant Ecology,2019,43(4):365-373.
- [33] 姜广争.岷江上游干旱河谷区不同土地利用方式土壤有机碳差异性特征研究[D].成都:四川农业大学,2012.
JIANG G Z. Study on differences characteristic of soil organic carbon of different land-use type in dry valley of the upper reaches of Minjiang River[D].Chengdu: Sichuan Agricultural University,2012.
- [34] YANG Y Y, FANG J Y, MA W H, et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s[J].Global Change Biology,2010,16(11):3036-3047.
- [35] 高俊琴,雷光春,李丽,等.若尔盖高原 3 种湿地土壤有机碳分布特征[J].湿地科学,2010,8(4):327-330.
GAO J G, LEI G C, LI L, et al. The distribution characteristics of soil organic carbon in three kinds of wetland soils in Zoigé Plateau[J].Wetland Science,2010,8(4):327-330.
- [36] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
LIU X J, LI X, LIANG X, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model[J].Tropical Geography,2019,39(3):397-409.
- [37] SANG L L, ZHANG C, YANG J Y, et al. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model[J].Mathematical and Computer Modelling,2011,54(3/4):938-943.
- (上接第 206 页)
- [25] 王正淑,王继军,刘佳.基于碳汇的县南沟流域退耕林地补偿标准研究[J].自然资源学报,2016,31(5):779-788.
WANG Z S, WANG J J, LIU J. Study on the compensation standard of returning farmland to forest in Xiannangou watershed from the perspective of carbon sink[J].Journal of Natural Resources,2016,31(5):779-788.
- [26] 李璐,夏秋月,董捷,等.武汉城市圈县域空间横向碳生态补偿研究:基于土地利用碳收支差异[J].生态学报,2023,43(7):2627-2639.
LI L, XIA Q Y, DONG J, et al. County-level carbon ecological compensation of Wuhan Urban Agglomeration under carbon neutrality target: Based on the difference in land use carbon budget[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(7):2627-2639.
- [27] 张梅,赖力,黄贤金,等.中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究[J].资源科学,2013,35(4):792-799.
ZHANG M, LAI L, HUANG X J, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China[J].Resources Science,2013,35(4):792-799.
- [28] 周萍,陈松林,李晶,等.福建省土地利用变化碳排放时空差异与碳补偿[J].水土保持通报,2022,42(3):356-365,372.
ZHOU P, CHEN S L, LI J, et al. Temporal and spatial differences in carbon emissions and carbon neutrality caused by land use changes in Fujian Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2022,42(3):356-365,372.
- [29] 李金昌.生态价值论[M].重庆:重庆大学出版社,1999.
LI J C. Discussion on ecological value[M].Chongqing: Chongqing University Press,1999.
- [30] 广东省统计局.广东统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011—2021.
Guangdong Provincial Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M].Beijing: China Statistical Publishing House,2011—2021.
- [31] 杨国清,朱文锐,文雅,等.20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究[J].生态环境学报,2019,28(2):332-340.
YANG G Q, ZHU W R, WEN Y, et al. Spatial differentiation in the intensity and efficiency of carbon emission from land use in Guangdong Province in past two decades[J].Ecology and Environmental Sciences,2019,28(2):332-340.
- [32] 任峰,龙定洪.广东省碳排放量测算、影响因素分析及预测模型选择[J].生态经济,2022,38(5):21-27,32.
REN F, LONG D H. Measurement of carbon emissions, analysis of influencing factors and selection of forecasting models in Guangdong Province[J].Ecological Economy,2022,38(5):21-27,32.