

# 2000~2022年三峡库区碳排放时空特征及其情景分析

肖晰文, 李燕\*

广州大学地理科学与遥感学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年5月2日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月30日

## 摘要

土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)所引发的碳排放问题是当前生态环境研究领域的热点, 分析和预测典型区域LUCC时空变化有助于区域土地利用结构优化与固碳减排目标的实现。本文基于三峡库区2000~2022年土地利用数据, 分析该区20多年LUCC导致的碳排放时空变化特征, 利用地理探测器揭示三峡库区碳排放的关键驱动因素, 并综合GeoSOS-Logistic-CA模型和灰色预测模型模拟2030~2050年惯性发展、耕地保护和生态保护三种情景下库区土地利用碳排放的时空差异。结果表明: (1) 2000~2022年三峡库区土地利用净碳排放量逐年上升, 22年间增幅超360%, 其中建设用地区为最大碳源, 林地为主要碳汇, 重庆主城区等为主要碳排放高值区, 库腹等区域为碳汇区域。(2) 人口密度与GDP总量是影响三峡库区土地利用碳排放的主要驱动力。(3) 惯性情景下2030~2050年三峡库区土地利用净碳排放量仍呈高位增长趋势, 耕地保护和生态保护情景下未来20年库区土地利用净碳排放量扩张趋势得到明显遏制。三峡库区土地利用碳排放存在明显时空异质性, 通过区域性减源增汇的有效策略, 可以促进库区绿色低碳可持续发展。

## 关键词

碳排放, 土地利用变化, GeoSOS-Logistic-CA模型, 地理探测器, 三峡库区

# Spatio-Temporal Characteristics and Scenario Analysis of Carbon Emission in the Three Gorges Reservoir Area in 2000~2022

Xiwen Xiao, Yan Li\*

School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Received: May 2<sup>nd</sup>, 2025; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

## Abstract

The carbon emission caused by Land Use/Cover Change (LUCC) is a hot research topic at present. Analyzing and predicting the temporal and spatial changes of LUCC-induced carbon emission in typical regions are conducive to the optimization of regional land use structure and the realization of carbon sequestration and emission reduction targets. Based on the land use data of the Three Gorges Reservoir area (TGRa) from 2000 to 2022, this paper analyzes the spatio-temporal changes of carbon emissions caused by LUCC over the past 20 years. Geodetector model was used to reveal the key drivers of land use on carbon emissions in TGRa, and GeoSOS-Logistic-CA model and grey prediction model were combined to simulate the spatio-temporal difference of land use and carbon emissions in TGRa from 2030 to 2050 under three development scenarios: inertial development, cultivated land protection and ecological protection. The results show that: (1) The net carbon emissions from land use in TGRa increased year by year with an increase of >360% from 2000 to 2022. The construction land was the largest carbon source, while the forest land was the largest carbon sink. The main urban area of Chongqing City was the key area of high-value carbon emission, and the warehouse area was a significant carbon sink area. (2) Population density and total GDP are the main driving forces affecting land use carbon emissions in TGRa. (3) Under the inertia scenario, the net carbon emissions of land use in the TGRa will still show a high growth trend from 2030 to 2050, and the expansion trend of net carbon emissions of land use in the TGRa in the next 20 years will be significantly curbed under the scenarios of cultivated land protection and ecological protection. There is obvious spatiotemporal heterogeneity of land use carbon emissions in the TGRa. Effective strategies for regional source reduction and carbon sequestration enhancement can promote sustainable green and low-carbon development in the reservoir area.

## Keywords

Carbon Emission, Land Use/Cover Change, GeoSOS-Logistic-CA Model, Geodetector, Three Gorges Reservoir Area

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)是人类活动的直观反映, 改变了生态系统的结构与功能, 直接影响着陆地生态系统的碳收支平衡, 从而加剧全球气候变化[1][2]。LUCC 引发的碳排放量占人类碳排放总量的 1/3, 成为一个地区碳排放的重要影响因素[3][4]。土地作为关联自然生态和社会经济的复杂系[5], 深入探究区域 LUCC 对碳排放的影响, 优化土地利用模式以遏制区域碳排放量的增长, 对于区域绿色高质量发展与缓解全球变暖趋势具有重要作用。近年来, 不少学者开展了区域碳排放对 LUCC 的响应研究, 证实了土地利用变化往往伴随大量碳交换过程, 导致大气中的碳含量增加[6][7]。其中, 建设用地是区域碳排放的主要来源[8], 其扩张是造成区域碳储量下降的主要原因[9][10]。在不同区域人类活动影响下, 土地利用方式与碳排放模式存在显著时空差异, 揭示典型区域土地利用对碳收支的影响机制, 将有助于“因地制宜”制定精准的减排策略, 增强区域碳封存能力, 助力我国的碳中和与可持续发展目标的实现。

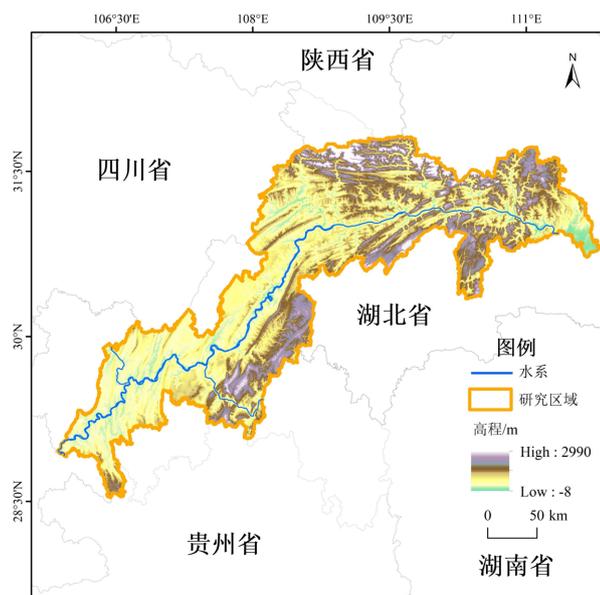
随着不同时空尺度 LUCC 对碳排放影响研究的深入, 相关研究方法得到不断更新和完善。土地利用变化格局与过程的模拟与预测研究涵盖了国家[3], [11]、流域[8]、省际[12]、都市圈[13]、县域[14]等空

间尺度,多采用小区域土地利用转换及其效应模型[15], [16] (Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent, CLUE-S)、未来用地模拟模型[17], [18] (Future Land Use Simulation, FLUS)、斑块生成土地利用变化模拟模型[19] (Patch-generating Land Use Simulation, PLUS)、地理模拟优化系统[20] (Geographical Simulation and Optimization System, GeoSOS)等。土地利用碳排放兼具自然、社会属性,其核算方法包括自下而上、自上而下两种类型[5]。前者主要包括模型模拟法[21]、样地清查法[22]、遥感估算法[23]等,主要通过自然生态系统中的具体土地利用过程来核算碳排放。后者则是以排放系数法[8]、因素分解法[14]、实测法[24]等为主,依赖宏观数据来核算土地所承载的社会经济活动的碳排放。诸多方法中,GeoSOS通过耦合地理元胞自动机、多智能体建模和空间优化,能对复杂地理格局和过程进行模拟与预测[20]。排放系数法也因其方法论的成熟性、数据获取的便利性,成为碳排放研究的重要途径。综上,GeoSOS理论结合排放系数法为三峡库区土地利用碳排放效应研究提供了重要的手段与方法。

三峡库区作为长江经济带上特殊的地理单元,是典型的生态敏感区、长江上游重要生态环境屏障,关乎长江中下游地区的生态安全,是长江经济带高质量发展关键片区[25], [26]。近年来,受长江三峡工程建设蓄水水位升高的影响,约 632 km<sup>2</sup>的土地被淹没[27];库区城镇化率逐年上升,城市扩展速度已高于全国平均水平[28]。三峡库区人地矛盾异常突出,其碳排放效应成为推动库区绿色低碳高质量发展的难题。以往研究多侧重于三峡库区绿色植被[29]、森林生态系统[30]、土壤[31]、农业[32]等角度的碳源/汇情况,缺乏库区碳排放对 LUCC 的响应研究和系统评估。因此,本研究利用 2000、2010、2022 年三峡库区 3 期土地利用数据,量化不同历史阶段三峡库区碳排放对 LUCC 的响应,通过耦合 GeoSOS 理论与灰色预测模型,模拟分析不同土地利用变化情景下库区碳排放的时空变化及其趋势,可为三峡库区科学利用土地资源、助力双碳目标与实现高质量发展提供依据与参考。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况与数据来源



注:该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改。下同。

Figure 1. Geographical location map of the study area

图 1. 研究区地理位置图

三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合部(29°16' N~31°44' N, 106°16' E~111°28' E), 覆盖 21 个县市区, 约占  $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。因跨鄂中山区峡谷及川东岭谷地带, 地形较为复杂, 以丘陵、山地为主, 约占库区总面积的 95%以上[33] (图 1)。库区属亚热带季风气候, 年均降水量为 1000~1800 mm, 年均气温为 14.9°C~18.5°C。土壤以紫色土、黄壤为主, 植物种类组成丰富, 其中乔木层植物 57 种、灌木层植物 119 种、草本层植物 78 种[34]。2022 年底库区常住人口约 2000 万, 城镇化率超 60%, 库区生产总值超 10,000 亿元。

本研究所使用的数据如表 1 所示, 2000~2022 年土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类[35]。选用高程、坡度、年降水量、年均温、距公路距离、距铁路距离、距城市驻点距离、人口密度、GDP 总量等作为土地利用变化影响因素。能源消耗数据用于建设用地碳排放核算。所有空间数据重采样为 250 m 空间分辨率, 统一投影为 WGS\_1984 坐标系。

**Table 1.** Data sources and descriptions  
**表 1.** 数据来源与说明

| 数据类型       | 数据特征                              | 来源                                                                                           |
|------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 土地利用       | 2000、2010、2022 年三期数据, 空间分辨率为 30 m | 武汉大学杨杰、黄昕[36]                                                                                |
| DEM        | 空间分辨率为 30 m                       | 地理空间数据云<br>( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )                   |
| 坡度         | 由 DEM 经表面分析生成                     | -                                                                                            |
| 降水、气温、GDP  | 空间分辨率为 1000 m                     | 中科院资源环境科学与数据中心<br>( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )              |
| 人口密度       | LandScan 人口密度数据集, 空间分辨率为 1000m    | 美国能源部橡树岭国家实验<br>( <a href="https://landscan.ornl.gov/">https://landscan.ornl.gov/</a> )      |
| 城镇驻点、公路、铁路 | 计算欧式距离                            | OSM 公开地图网<br>( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> ) |
| 能源数据       | 能源消费总量, 以标准煤计                     | 重庆市、恩施州、宜昌市统计年鉴                                                                              |

## 2.2. 研究方法

### 2.2.1. 土地利用碳排放核算

(1)直接核算法耕地、林地、草地、水域及未利用地等造成碳排放借鉴 IPCC (2006)提出的碳排放因子估算法[37], 各类土地利用类型的碳排放/吸收系数见表 2。土地利用碳排放核算表达式如下:

$$I_i = S_i \times \sigma_i \quad (1)$$

式中:  $I_i$  为第  $i$  类土地利用类型的碳排放量/吸收量(t);  $S_i$  为第  $i$  类土地利用类型面积( $\text{hm}^2$ );  $\sigma_i$  为第  $i$  类土地利用类型的碳排放/吸收系数( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。

**Table 2.** Carbon budget coefficient of land use  
**表 2.** 土地利用碳收支系数

| 土地利用类型 | 碳吸收系数  | 碳排放系数 | 来源       |
|--------|--------|-------|----------|
| 林地     | -0.49  | -     | 蓝家程等[38] |
| 草地     | -0.02  | -     | 蓝家程等[38] |
| 水域     | -0.46  | -     | 方精云等[39] |
| 未利用地   | -0.005 | -     | 段晓男等[40] |
| 耕地     | -      | 0.37  | 禹康康等[8]  |

(2) 间接核算法: 建设用地承载着人类生产活动所造成的大量碳排放, 故利用能源消耗所造成的碳排放来间接核算建设用地所造成的碳排放, 本文采用韩方红等[41]的方法进行核算, 其表达式为:

$$I = \sum E_i \times f_i \quad (2)$$

式中,  $I$  为建设用地碳排放量(t);  $E$  为能源消耗总量(t);  $f$  为能源消耗碳排放系数(以标准煤计), 借鉴相关成果[42], 取 0.7488 (t/t)。

### 2.2.2. 土地利用碳排放预测

(1) 土地利用变化模拟: GeoSOS 提供人工神经网络方法(ANN-CA)、决策树方法(DT-CA)、逻辑回归方法(Logistic-CA)三种数学模型对元胞自动机进行模拟, 三种方法对元胞自动机(cellular automata, CA)的模拟均具有较高精度, 而 Logistic-CA 在训练阶段较另外两种方法耗时更短, 且可以对随机扰动强度参数  $\delta$  值进行控制, 能更好模拟城市用地扩张情况[43], 故本研究运用 Logistic-CA 对库区土地利用进行模拟。在模型训练阶段, 按照 5% 比例对影响土地利用变化的各空间变量进行随机抽样, 并将抽样数据进行逻辑回归, 获得回归常数及各空间变量的回归系数。模拟阶段, 通过逻辑回归模型所得相关参数及转移概率值来判别当前栅格是否可以转换, 并将随机扰动强度参数  $\delta$  值设置为 3。模拟过程结束后, 采用 Kappa 系数和 FoM 精度值来检验模拟结果的准确性和可靠性。

(2) 灰色预测模型: GM(1,1)模型可通过少量、不完整的信息进行有效预测, 模型精度较高, 检验方便, 适用于指数增长性的中短期预测, 如人口数量、能源消耗、工业产值等。本文基于此模型对三峡库区能源消耗数据进行趋势预测, 从而对其带来的建设用地碳排放进行间接核算, 并通过后验差比值  $C$  与平均相对误差  $\varepsilon$  对模拟结果进行精度验证[44] [45]。

(3) 情景设置: 根据三峡库区当前社会经济发展水平, 结合区域发展规划, 本研究设置惯性发展、耕地保护、生态保护三种情景来预测库区 2030~2050 年土地利用变化。惯性发展情景是基于 2010~2022 年土地利用转移概率进行 Logistic-CA 模拟预测得到; 耕地保护与生态保护情景是根据《重庆市自然资源保护和利用“十四五”规划》《湖北省自然资源保护和开发“十四五”规划》中对土地开发强度的约束性设定, 严格控制建设用地规模(面积增长率  $\leq 15\%$ ), 即将建设用地像元数目的增长速率设定为 15%, 并结合 2010~2022 年土地利用转移概率矩阵, 前者严格控制耕地向其他地类转变; 后者严格控制林地、水域等生态用地流失。

### 2.2.3. 土地利用碳排放驱动因子探测

本研究利用因子探测器与交互探测器[46]量化不同历史时期各因子及因子之间交互作用对土地利用碳排放时空变化的驱动机制, 度量库区碳排放的空间分异程度, 并进行显著性检验和归因分析。

(1) 因子探测: 通过  $q$  值度量某驱动因子( $X$ )对于因变量( $Y$ )的解释力大小, 其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (5)$$

式中:  $q$  代表探测因子( $X$ )对于因变量( $Y$ )的解释力, 值域为[0, 1],  $q$  值越大说明解释力越强;  $h=1, 2, \dots, L$  表示变量  $Y$  或  $X$  的分层;  $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  与全区  $Y$  的方差;  $SSW$  与  $SST$  分别代表层类方差之和与全区总方差。

(2) 交互探测: 探测两种因子对因变量  $Y$  的交互作用, 并与单因子探测的  $q$  值相比较, 从而评估双因子交互作用对因变量的解释力是否会增加或减弱, 其交互作用类型可分为非线性减弱、双因子增强、单因子非线性减弱、非线性增强、相互独立等五类。

(3) 指标选取: 借鉴樊舒迪等[47]、李辉丹等[48]的研究, 选取不同用地类型的碳排放量代表因变量  $Y$  值; 选取高程(X1)、坡度(X2)、年降水量(X3)、年均温(X4)、距公路距离(X5)、距铁路距离(X6)、距城市驻点距离(X7)、人口密度(X8)、GDP 总量(X9)作为自变量, 所有因子按自然断点分级法分为 5 类。考虑到采样点数量对于模型运行效率的影响, 将研究区划分为  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  格网, 并对各个像元进行采样, 累计生成 2288 个有效采样点。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 三峡库区土地利用碳排放时空分布特征

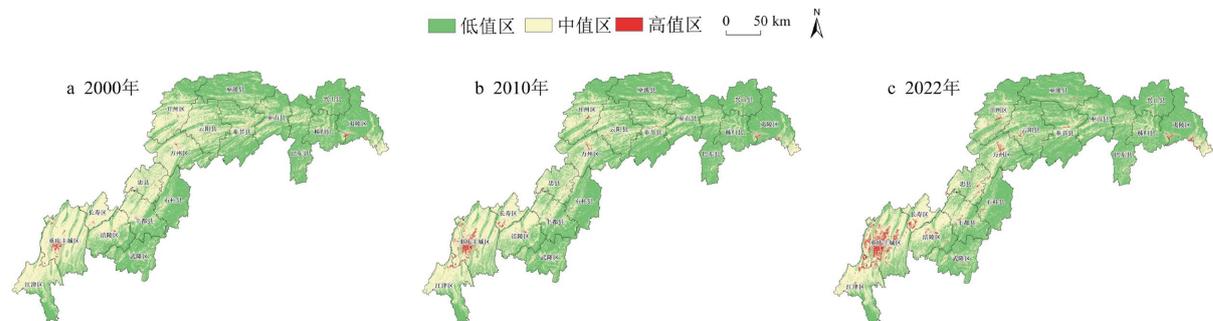
2000~2022 年三峡库区土地利用碳排放量(表 3)估算得到, 2000 年、2010 年、2022 年三峡库区净碳排放量分别为  $8.94 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $2.67 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $4.12 \times 10^7 \text{ t}$ 。对应地, 三个时期建设用地面积分别为  $4.3431.12 \text{ hm}^2$ 、 $70143.12 \text{ hm}^2$ 、 $131946.39 \text{ hm}^2$ 。22 年间土地利用净碳排放量随着建设用地面积的增加而显著增加, 其增幅高达 360.08%。其中, 2000~2010 年增幅为 198.22%, 而近 12 年来增幅下降, 为 54.28%。

从碳源/汇的视角看, 耕地和建设用地为库区的主要碳源, 2000~2022 年建设用地急剧扩张, 其碳排放量对碳源的贡献率由 91.98%增长至 98.35%。与建设用地相比, 耕地碳源贡献率较小, 为 1.65~8.01%, 随着耕地不断减少, 2022 年耕地碳排放量下降了 15.26%。22 年间, 库区碳汇呈现上升趋势, 累计增加 9.3%。林地、草地、水域碳吸收贡献分别为 97.5~98.04%、0.01~0.08%、1.88%~2.32%, 林地碳汇量显著大于草地和水域。

**Table 3.** Carbon budget of different land use types in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2022 ( $10^4 \text{ t}$ )

**表 3.** 2000~2022 年三峡库区不同土地利用类型碳收支量( $10^4 \text{ t}$ )

| 年份   | 碳源    |         |         | 碳汇      |       |       |           | 净碳排放量   |         |
|------|-------|---------|---------|---------|-------|-------|-----------|---------|---------|
|      | 耕地    | 建设用地    | 合计      | 林地      | 草地    | 水域    | 未利用地      | 合计      |         |
| 2000 | 84.83 | 973.68  | 1058.51 | -160.84 | -0.13 | -3.08 | -0.000001 | -164.05 | 894.46  |
| 2010 | 75.03 | 2843.62 | 2918.65 | -171.77 | -0.11 | -4.3  | -0.000006 | -176.18 | 2742.47 |
| 2022 | 71.88 | 4294.55 | 4366.43 | -175.12 | -0.02 | -4.16 | -0.0003   | -179.3  | 4187.13 |



**Figure 2.** Spatio-temporal change pattern of land use carbon emissions in the Three Gorges Reservoir area in 2000~2022

**图 2.** 2000~2022 年三峡库区土地利用碳排放时空演变格局

2000~2022 年三峡库区土地利用碳排放呈现出西部高、东部低的空间格局(图 2)。重庆主城区、万州区及夷陵区等属于碳排放高值区, 与这些区域城镇化水平高、建设用地面积占比大密切相关; 长江、嘉

陵江等沿岸属于碳排放中值区, 主要由于大面积的耕地毗邻水源, 而耕地为仅次于建设用地的第二大碳源; 库区东北部及其腹地是碳排放低值区, 主要因为该区域林地、草地广布, 成为最大的库区碳汇。综上, 22 年三峡库区土地利用碳排放高值区呈不断扩张趋势, 2010~2022 年碳排放高值区扩张趋势尤为明显, 主要体现以重庆主城区为代表的集聚扩大与库腹、库尾为代表的零星扩大, 这与库区建设用地面积扩张趋势基本保持一致。

### 3.2. 三峡库区土地利用碳排放驱动因素

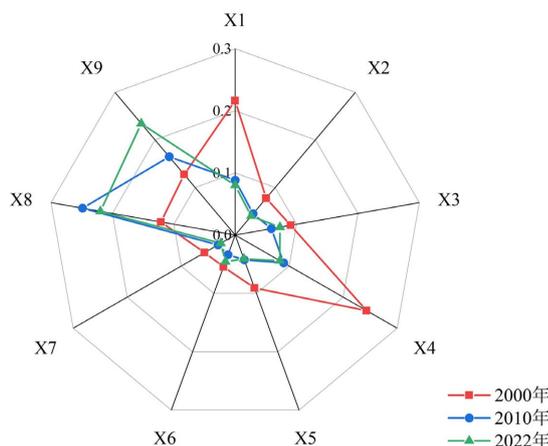


Figure 3. Single factor detection radar map of land use carbon emissions in the Three Gorges Reservoir area

图3. 三峡库区土地利用碳排放的单因子探测雷达图

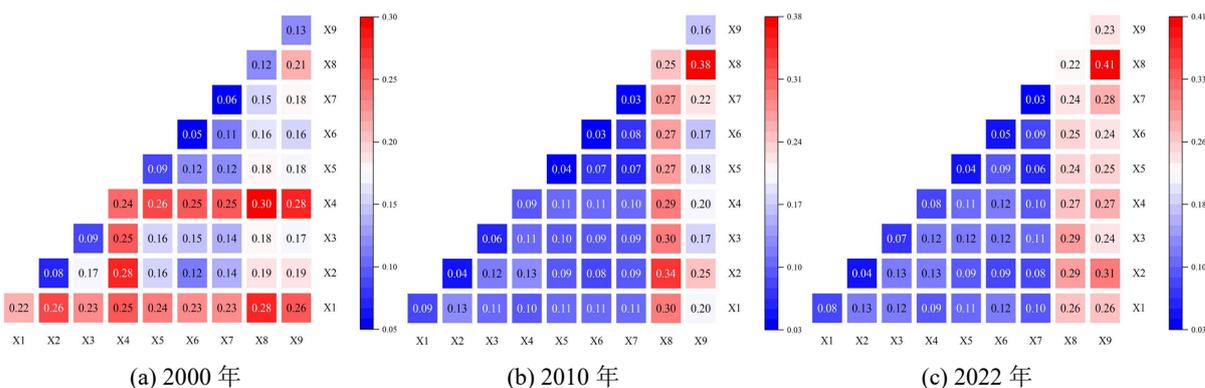


Figure 4. Interactive detection of driving factors of land use carbon emissions in the Three Gorges Reservoir area

图4. 三峡库区土地利用碳排放驱动因子的交互探测

基于 2000、2010、2022 年三个时期碳排放时空分异的驱动因素的  $q$  值排序分析(图 3)发现: 2000 年, 高程与年均温的  $q$  值均大于 0.2, 是影响土地利用碳排放空间分异的主导因子, 这与生产活动多集中在温暖且地势低平地区密切相关; 而坡度、年降水量的  $q$  值仅为 0.1 左右, 其解释碳排放空间分异的能力一般。在社会经济因素中, 人口密度与 GDP 总量具有较强的解释能力,  $q$  值均大于 0.12。2010 年, 自然环境因子的解释力均呈下降态势, 而人口密度与 GDP 总量的解释力均增大, 表明随着科技进步, 自然条件对用地变化的限制逐渐减弱, 社会经济发展成为碳排放空间分异的主要驱动力。与 2010 年相比, 2022 年各因子对三峡库区土地利用碳排放的解释力变化不大, 但距公路距离、距铁路距离的  $q$  值有所提升, 渝万高铁、三峡翻坝高速等交通基础设施的建设驱动着库区土地利用的相互转化, 从而增加了碳排放。综

合来看, 社会经济因素, 尤其是人口密度和 GDP 总量, 是三峡库区土地利用碳排放的关键驱动因素, 交通基础设施的发展对碳排放的影响也日益显著。

对三峡库区土地利用碳排放空间分异的多因子交互分析发现, 两两因子交互的  $q$  值均表现出不同程度的提高, 不同时段各因子交互后的解释力存在差异(图 4)。2000 年, 高程与坡度( $X1 \cap X2$ )、高程与年均温( $X1 \cap X4$ )、高程与人口密度( $X1 \cap X8$ )、高程与 GDP 总量( $X1 \cap X9$ )、坡度与年均温( $X2 \cap X4$ )、年降水量与年均温( $X3 \cap X4$ )、年均温与距公路距离( $X4 \cap X5$ )、年均温与距铁路距离( $X4 \cap X6$ )、年均温与距城市驻点距离( $X4 \cap X7$ )、年均温与人口密度( $X4 \cap X8$ )、年均温与 GDP 总量( $X4 \cap X9$ )等 11 对因子的交互作用具有较强的解释力, 其  $q$  值均大于 0.25, 表明海拔高度、年均温、人口密度及 GDP 总量是影响 2000 年库区碳排放空间分布的关键因素。2000~2010 年间, 各因子的交互作用解释力有所增强。与单因子分析相比, 人口密度、GDP 总量与其他因子的交互作用解释力显著增强,  $q$  值在 0.17~0.34 之间, 显示出人口与经济要素与自然环境因子的结合对碳排放空间分异的影响更加显著。与 2010 年类似, 2022 年各因子的交互作用解释力也有一定提升。其中高程  $\cap$  人口密度、坡度  $\cap$  人口密度、年均温  $\cap$  人口密度等 11 对因子  $q$  值均大于 0.25。2010~2020 年, 人口密度  $\cap$  GDP 总量是三峡库区土地利用碳排放的最强解释因子,  $q$  值分别为 0.38 和 0.41, 与单因子分析结果吻合。综上所述, 在自然环境因子和社会经济因子的共同作用下, 人口密度和 GDP 总量是三峡库区土地利用碳排放空间分异的关键驱动因素, 进一步证实了土地利用类型的变化是一个多因素综合作用的过程。

### 3.3. 三峡库区土地利用碳排放情景分析

2030~2050 年三峡库区土地利用碳收支情景分析表明, 6 种用地类型碳收支格局基本保持稳定(表 4), 但不同情景下的净碳排放差异显著。2030 年三峡库区 3 种情景模式下的土地利用碳排放仍未达峰。惯性发展情景下, 因建设用地持续扩张, 库区净碳排放量增长显著, 由 2030 年的  $7.54 \times 10^7$  t 增长到 2050 年的  $2.36 \times 10^8$  t, 平均增长率超 75%。而耕地保护和生态保护情景碳排放量虽仍有所增加, 但增速相对较缓, 表现出更有效的碳减排效果。与 2022 年相比, 2030 年两种情景分别增加 46.9%和 51.8%的碳排放; 预测到 2040 年, 较 2030 年分别增加 46.5%和 47.5%; 到 2050 年, 较 2040 年分别增加 46.5%和 46.1%。2030~2050 年, 两种保护情景较惯性发展情景分别减少 24.7%和 20.8%、50.1%和 44.4%、80.2%和 73.9%的碳支出, 显示出二者在抑制碳排放增长方面的显著优势。2030~2050 年碳汇量总体保持稳定, 林地碳汇量变幅为-1.33~0.02%、-2.45~0.02%、-3.68~0.02%, 波动相对较小, 草地、水域碳汇量基本保持不变。碳汇量最大的是生态保护情景, 惯性情景次之, 耕地保护情景最少。

**Table 4.** Carbon budget of different land use types in the Three Gorges Reservoir Area under different scenarios during 2030~2050 ( $10^4$  t)

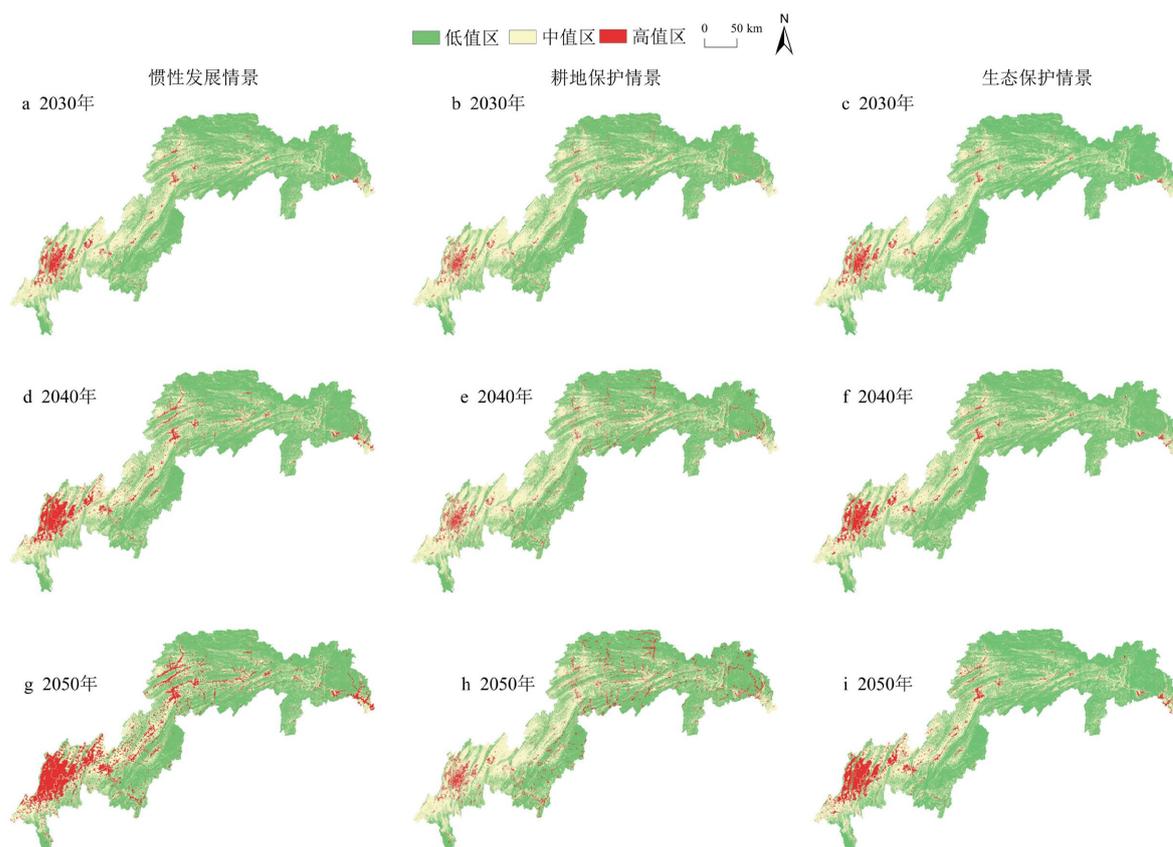
**表 4.** 2030~2050 年不同情景下三峡库区不同土地利用类型碳收支量( $10^4$  t)

| 情景     | 年份   | 碳源    |          |          | 碳汇      |       |       |          |         | 净碳排放量    |
|--------|------|-------|----------|----------|---------|-------|-------|----------|---------|----------|
|        |      | 耕地    | 建设用地     | 合计       | 林地      | 草地    | 水域    | 未利用地     | 合计      |          |
| 惯性发展情景 | 2030 | 68.26 | 7653.73  | 7721.99  | -174.56 | -0.02 | -4.16 | -0.00001 | -178.74 | 7543.25  |
|        | 2040 | 62.46 | 13415.60 | 13478.06 | -172.79 | -0.02 | -4.16 | -0.00001 | -176.98 | 13301.09 |
|        | 2050 | 53.79 | 23515.11 | 23568.90 | -167.53 | -0.02 | -4.16 | -0.00001 | -171.71 | 23397.19 |
| 耕地保护情景 | 2030 | 71.84 | 6153.42  | 6225.26  | -172.41 | -0.02 | -4.16 | -0.00001 | -176.59 | 6048.66  |
|        | 2040 | 71.84 | 964.65   | 9036.49  | -168.19 | -0.02 | -4.16 | -0.00001 | -172.37 | 8864.12  |
|        | 2050 | 71.84 | 13077.48 | 13149.32 | -162.00 | -0.02 | -4.16 | -0.00001 | -166.19 | 12983.14 |

续表

|        |      |       |          |          |         |       |       |          |         |          |
|--------|------|-------|----------|----------|---------|-------|-------|----------|---------|----------|
| 生态保护情景 | 2030 | 69.50 | 6355.58  | 6425.08  | -175.15 | -0.02 | -4.16 | -0.00002 | -179.34 | 6245.74  |
|        | 2040 | 66.12 | 9323.16  | 9389.28  | -175.15 | -0.02 | -4.16 | -0.00002 | -179.34 | 9209.94  |
|        | 2050 | 61.28 | 13573.98 | 13635.26 | -175.15 | -0.02 | -4.16 | -0.00001 | -179.34 | 13455.92 |

2030~2050年三峡库区土地利用碳排放高值区呈持续扩张趋势(图5)。惯性发展情景下,库尾的碳排放高值区扩张尤为显著,库腹的高值区则从早期零星分布、不明显的状态逐渐过渡到斑块状分布,三个阶段高值区面积分别占4.21%、7.57%、13.52%。这与城市化和基础设施建设的驱动作用密切相关,导致碳排放区域快速扩展。耕地保护情景下,碳排放高值区在库尾仅有小幅扩张,其扩展趋势得到有效遏制,但在库腹地区高值区由零星分布转向多条带式分布,伴随着碳汇区域的缩减,表明耕地保护会导致一些林地和草地的转变,进而影响到区域碳汇能力。生态保护情景下,碳排放高值区虽然在库尾也呈扩张趋势,但较惯性发展情景较弱,扩张幅度略大于耕地保护情景。这两种情景在保持区域生态平衡和减缓碳排放方面具有积极影响,可有效实现库区碳减排与环境与经济的协调发展。



**Figure 5.** Spatial-temporal change pattern of land use carbon emissions in the Three Gorges Reservoir area under different scenarios in 2030~2050

**图 5.** 2030~2050 年不同情景下三峡库区土地利用碳排放时空演变格局

## 4. 讨论

### 4.1. 三峡库区土地利用碳排放时空特征及驱动机制

2000~2022年,随着三峡库区城市化进程的加快,土地利用格局发生了显著变化,尤其是建设用地的

扩张推动了碳排放的增加。这一过程中, 耕地逐渐被建设用地侵占, 而受严格的“占补平衡”耕地保护制度的约束[49], 流失的耕地必须得到补充, 通常新开垦的耕地来源于林地[9]。林地作为碳密度较高的土地类型, 其减少不仅削弱了库区的碳汇能力, 还进一步推动了碳排放的增长。从空间分布特征看, 三峡库区土地利用碳排放在空间上呈现出明显的“西高东低”的分布格局, 与鄂施璇等[50]的研究结论一致。库区西部因高度城市化及高密度人口分布等多种复杂因素影响, 使得碳排放水平相对较高, 且在空间上呈现出较为明显的连续性和集中性; 而库区东北部大面积位于武陵山区、秦巴山区, 森林覆盖率高, 形成了与西部鲜明对比的低碳排放区。

人口增长和经济活动扩张是库区碳排放增加的主要驱动因素, 这与尹珂等[51]的研究结论一致。早期阶段, 高程、年均温等自然因素对碳排放的影响较显著, 而后续社会经济因素的影响增强, 比如人口增长导致对住房、基础设施等需求增加, 导致建设用地扩张, 对碳排放产生重要影响。且交通基础设施对碳排放的影响也不可忽视[52], 发达完善的路网体系, 不仅促进了地区间的经济联动与人员流动, 还加速了对城市边缘地区的开发, 推动了建设用地向外扩展。这种扩展不仅改变原有的土地利用模式, 还可能导致区域土地碳汇能力的下降, 从而进一步增加碳排放。

#### 4.2. 多情景下三峡库区土地利用碳排放变化及对策

2030~2050 年惯性发展情景下三峡库区土地利用碳排放仍保持高位增长趋势, 耕地保护和生态保护情景下碳排放虽得到有效遏制, 但三种情景模式均与 2030 年碳达峰目标冲突。惯性发展情景假设现有土地利用开发强度不变, 城市化、基础设施建设等高碳排放活动将持续, 而由于缺乏有效的减排政策和调控, 碳排放将继续高速增长, 影响碳达峰目标的实现。耕地保护情景虽保障了粮食安全, 但扩大耕地面积并未显著提升碳吸收能力。生态保护情景尽管通过保护林地和草地增加了碳汇, 但减排效果不足以完全抵消建设用地碳排放的增长。

为实现三峡库区的低碳发展目标, 应以减源增汇为导向, 合理规划各类土地利用方式。针对库尾的重庆中心城区及长江干流沿线的城建区域, 需严格控制建设用地扩张, 并科学合理规划城市用地。一方面强化对周边未利用地的开发, 降低对现有生态用地的占有; 另一方面, 提升单位面积的立体容纳能力, 促进城市空间的紧凑化发展等。武隆、奉节、巫山、巫溪、石柱、秭归等库腹、库首区县需强化对林地等高碳密度地类的保护和修复, 通过生态补偿机制提高森林覆盖率[53], 增加碳汇功能。江津、涪陵、长寿、丰都等库尾、库腹区县则须挖掘耕地减源潜力, 如改良耕作方式与优化施肥模式等, 同时推广可持续农业和土壤增汇技术以提升耕地碳吸收能力[54]。在交通基础设施领域, 应合理规划路网布局, 避免其对生态区的干扰, 同时大力推广新能源汽车的使用, 减少交通领域的碳排放。

### 5. 结论

(1) 2000~2022 年三峡库区碳排放总量和净碳排放量均呈上升趋势, 其中建设用地的贡献最大。库区土地利用碳排放在空间上大致呈西高东低分布格局, 碳排放高值区主要分布于重庆主城区等区域; 碳汇区域主要分布于库区东北部及库区腹部。

(2) 人口密度与 GDP 总量是影响三峡库区土地利用碳排放空间分异的主要驱动因子, 社会经济因素对土地利用碳排放格局演变的解释力均大于自然环境因素。

(3) 惯性发展情景下 2030~2050 年三峡库区建设用地面积持续扩张, 土地利用净碳排放量进一步上升, 而耕地保护与生态保护情景下建设用地扩张趋势得到遏制, 相应的净碳排放量也有望得到遏制。

(4) 应继续巩固退耕还林、退耕还草政策, 特别是在库区东北部等碳汇功能强的区域。此外, 在高碳排放区如重庆中心城区, 需提升土地利用效率, 最大限度地减少碳排放并提升土地的碳汇能力。

本研究在三峡库区土地利用碳排放的估算方面有待完善, 未来研究应进一步优化碳排放核算方法, 充分考虑碳排放系数的区域异质性以及清洁能源应用趋势。同时, 将土地利用类型情景模拟有效整合具体减排措施, 更加系统地预测碳排放趋势, 深入探索实现双碳目标的低碳发展路径, 支持库区的高质量发展。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(42171149), 中国地质调查局地质调查项目(DD20221929)。

## 参考文献

- [1] Li, H., Wang, C., Zhang, F., He, Y., Shi, P., Guo, X., *et al.* (2021) Atmospheric Water Vapor and Soil Moisture Jointly Determine the Spatiotemporal Variations of CO<sub>2</sub> Fluxes and Evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau Grasslands. *Science of the Total Environment*, **791**, Article ID: 148379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148379>
- [2] 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 等. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4655-4665.
- [3] Houghton, R.A. (1999) The Annual Net Flux of Carbon to the Atmosphere from Changes in Land Use 1850-1990. *Tellus B*, **51**, 298-313. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1999.00013.x>
- [4] 郑永超, 文琦. 宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 207-212.
- [5] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1545-1559.
- [6] 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.
- [7] 杨静媛, 张明, 多玲花, 等. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2312-2321.
- [8] 禹康康, 王延华, 孙恬, 等. 太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J]. 土壤, 2022, 54(2): 406-414.
- [9] 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.
- [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, 239.
- [11] 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, 2023, 44(3): 1267-1276.
- [12] 吉雪强, 刘慧敏, 张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网结构演化及驱动因素[J]. 经济地理, 2023, 43(2): 190-200.
- [13] 陈绮桐, 林锦耀. 多情景下珠江三角洲地区土地利用变化对生态系统服务的影响预测[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(5): 612-621.
- [14] 黄汉志, 贾俊松, 张振旭. 江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8390-8403.
- [15] Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. and Mastura, S.S.A. (2002) Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model. *Environmental Management*, **30**, 391-405. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x>
- [16] 王丽艳, 张学儒, 张华. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 73-77.
- [17] Li, X. and Yeh, A.G. (2002) Neural-Network-Based Cellular Automata for Simulating Multiple Land Use Changes Using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, **16**, 323-343. <https://doi.org/10.1080/13658810210137004>
- [18] Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., *et al.* (2017) A Future Land Use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land Use Scenarios by Coupling Human and Natural Effects. *Landscape and Urban Planning*, **168**, 94-116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>
- [19] Liang, X., Guan, Q., Clarke, K.C., Liu, S., Wang, B. and Yao, Y. (2021) Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, **85**, Article ID: 101569. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569>

- [20] Li, X., Chen, Y., Liu, X., Li, D. and He, J. (2010) Concepts, Methodologies, and Tools of an Integrated Geographical Simulation and Optimization System. *International Journal of Geographical Information Science*, **25**, 633-655. <https://doi.org/10.1080/13658816.2010.496370>
- [21] Houghton, R.A. (2003) Why Are Estimates of the Terrestrial Carbon Balance So Different? *Global Change Biology*, **9**, 500-509. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00620.x>
- [22] 王雪晴, 卜元坤, 魏江涛, 等. 黄龙山森林植被地上碳储量时空变化及驱动力[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7896-7909.
- [23] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 基于土地利用和夜间灯光数据的京津冀区域碳排放时空分异研究[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(6): 36-42.
- [24] 赵露, 王效科, 姚扬, 等. 城市复杂环境中碳通量日变化规律及其影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4549-4560.
- [25] Yu, H., Luo, Y., Liu, S.Q., Wang, Y., Yang, Y. and Liu, W.D. (2015) The Influences of Topographic Relief on Spatial Distribution of Mountain Settlements in Three Gorges Area. *Environmental Earth Sciences*, **74**, 4335-4344. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4443-2>
- [26] 余世勇. 三峡库区生态与经济同步建设的难点及对策[J]. 生态经济, 2012, 254(6): 64-66.
- [27] 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 等. 三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 688-698.
- [28] 刘彦随, 璩路路. 近 30 年三峡库区用地格局变化与人地系统演化[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1664-1676.
- [29] 冯源, 肖文发, 黄志霖, 等. 未来气候变化情景下三峡库区马尾松林生物量固碳动态与空间分异[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3567-3576.
- [30] 王娜, 楚鑫磊, 勾蒙蒙, 等. 三峡库区森林生态系统服务权衡与协同分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 475-484
- [31] 王富华, 吕盛, 黄容, 等. 缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1504-1511.
- [32] 肖晰文, 刘春红, 刘再森, 等. 三峡库区(湖北段)农业碳排放特征、驱动因素与趋势预测[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(9): 212-222.
- [33] 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.
- [34] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态与环境检测公报(2015) [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [35] 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.
- [36] Yang, J. and Huang, X. (2021) The 30m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, **13**, 3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>
- [37] Amstel, A.V. (2006) IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- [38] 蓝家程, 傅瓦利, 袁波, 等. 重庆市不同土地利用碳排放及碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 146-150, 155.
- [39] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007(6): 804-812.
- [40] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008(2): 463-469.
- [41] 韩方红, 高凡, 何兵, 等. 1990-2020 年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3297-3307.
- [42] 石洪昕, 穆兴民, 张应龙, 等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101-106.
- [43] 陶伟, 刘译泽, 孙清, 等. 基于 GeoSOS 模型的金华市土地利用变化动态模拟[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2024, 47(3): 249-256.
- [44] 凯吾沙·塔依尔, 黎华, 古丽米热·艾尔肯, 等. FLUS 与灰色预测模型支持下的乌鲁木齐地区碳排放时空演变与预测[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 214-226.
- [45] 刘思峰, 曾波, 刘解放, 等. GM(1, 1)模型的几种基本形式及其适用范围研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 501-508.
- [46] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

- 
- [47] 樊舒迪, 刘振华, 朱明帮, 等. 基于地理探测器的广州市土地利用时序变化及影响因素[J]. 西南农业学报, 2022, 35(10): 2276-2289.
- [48] 李辉丹, 史东梅, 夏蕊, 等. 基于地理探测器的重庆坡耕地时空格局演变特征及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 280-290.
- [49] 罗卓, 李小兰. 耕地占补平衡指标交易价格测算方法探讨——以重庆市为例[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(6): 48-54.
- [50] 鄂施璇, 李琴, 张露洋. 三峡库区 1980-2021 年土地利用碳排放格局及碳补偿[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 300-306
- [51] 尹珂, 廖思雨. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的三峡库区(重庆段)碳储量时空变化及预测[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(9): 60-69
- [52] 张俊峰, 张安录, 董捷. 武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 595-602.
- [53] 张仕超, 刘竞宇, 冉龙池, 等. 基于提高森林覆盖率目标的跨区县横向生态补偿与供需对接——以重庆市为例[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4651-4663.
- [54] 周恒阳, 张军以, 彭国川. 重庆三峡库区农业碳排放脱钩效应及驱动因素[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文): 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432.S.20240903.1739.001.html>, 2024-10-24.