

# 长江中下游典型区域土地利用碳排放风险 ——以江西省九江市为例

刘春英<sup>1</sup>, 檀斯园<sup>1</sup>, 王骏博<sup>1</sup>, 刘莉<sup>2</sup>

(1.江西财经大学 旅游与城市管理学院, 江西 南昌 330032; 2.赣州市住房公积金管理中心, 江西 赣州 341000)

**摘要:** [目的] 定量测算江西省九江市土地利用碳排放, 揭示其时空演变特征, 并估算土地利用碳排放风险, 为九江市构建绿色低碳土地利用方式提供科学参考。[方法] 采用土地利用碳排放系数法测度 2000—2020 年九江市土地利用碳排放和时空变化规律, 并从网格化的视角, 利用碳排放风险指数识别各县区碳排放风险, 基于对数平均迪式指数(LMDI)模型, 分析土地利用碳排放的影响因素。[结果] 2000—2020 年九江市土地利用净碳排放量呈递增趋势, 年均增幅为 13.75%, 建设用地是主要碳源, 占碳排放量的 90% 以上, 林地是主要碳汇。九江市净碳排放量呈现“东北高, 西南低”的空间分布特征, 森林覆盖率好的武宁县、修水县一直处于碳汇功能, 濂溪区、浔阳区、湖口县、瑞昌市的碳排放量占九江市净碳排放量的 95% 以上。九江市土地利用碳排放风险整体偏低, 并呈现“东北高, 西南低”的分布特征, 长江沿岸县区濂溪区、浔阳区和柴桑区处于高度碳排放风险区。经济发展水平是碳排放增加的主要因素, 能源消费强度则是抑制碳排放的关键因素。[结论] 2000—2020 年九江市土地利用碳排放大幅增加, 应控制新增碳源用地, 优化土地利用结构, 并积极探索低碳绿色能源利用体系, 着力推进长江经济带绿色低碳发展的“九江模式”建设。

**关键词:** 土地利用; 碳排放; 影响因素; LMDI 模型; 碳排放风险; 江西省九江市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)01-0341-09

**中图分类号:** F301, X24

**文献参数:** 刘春英, 檀斯园, 王骏博, 等. 长江中下游典型区域土地利用碳排放风险[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 341-349. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.003; Liu Chunying, Tan Siyuan, Wang Junbo, et al. Carbon emission risk from land use in typical regions of middle and lower Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 341-349.

## Carbon Emission Risk from Land Use in Typical Regions of Middle and Lower Yangtze River —A Case Study at Jiujiang City, Jianxi Province

Liu Chunying<sup>1</sup>, Tan Siyuan<sup>1</sup>, Wang Junbo<sup>1</sup>, Liu Li<sup>2</sup>

(1. School of Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi 330032, China; 2. Housing Accumulation Fund Management Center of Ganzhou, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

**Abstract:** [Objective] The land use carbon emissions in Jiujiang City, Jiangxi Province were quantitatively measured, and its temporal and spatial evolution characteristics, and the risk of land use carbon emissions were determined in order to provide a scientific reference for the construction of green and low-carbon land use methods in Jiujiang City. [Methods] Land use carbon emissions, and their temporal and spatial variation characteristics in Jiujiang City from 2000 to 2020 were measured by the carbon emission coefficient method. The carbon emission risk of each county was identified by the carbon emission risk index based on grid perspective. The factors influencing land use carbon emissions were analyzed based on the logarithmic mean division index (LMDI) model. [Results] Net carbon emissions from land use in Jiujiang City have been increasing at an average annual rate of 13.75% during 2000—2020. Construction land was the main carbon source, accounting for more than 90% of the carbon emissions, whereas forest land was the main carbon

收稿日期: 2022-05-31

修回日期: 2022-07-25

资助项目: 江西省教育厅科技项目“基于地统计学的鄱阳湖区农田土壤重金属生态风险研究”(GJJ190256)

第一作者: 刘春英(1976—), 女(汉族), 江西省南康市人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用与生态环境评价研究。Email: jxcdley@126.com。

sink. Additionally, net carbon emissions in Jiujiang City presented a spatial distribution pattern of “high in northeast and low in southwest”. Wuning County and Xiushui County have good forest coverage and have always been carbon sinks. Lianxi District, Xunyang District, Hukou County, and Ruichang City, with more construction land, had the largest net carbon emissions and accounted for more than 95% of carbon emissions in Jiujiang City. Moreover, the carbon emission risk from land use in Jiujiang City was generally low, and showed a distribution pattern of “high in northeast and low in southwest”. High carbon emission risk areas were Lianxi District, Xunyang District, and Chaisang District, all along the Yangtze River. Economic development level was the main factor increasing carbon emissions, while energy consumption intensity was the key factor curbing carbon emissions. [Conclusion] Carbon emissions from land use have increased significantly during 2000—2020. New carbon source land use should be controlled, land use structure should be optimized, a low-carbon, green-energy utilization system should be actively constructed, and “Jiujiang model” construction of green and low-carbon development should be promoted in the Yangtze River Economic Belt.

**Keywords:** land use; carbon emission; influencing factors; logarithmic mean division index (LMDI); carbon emission risk; Jiujiang City of Jiangxi Province

近年来,温室效应引发的气候变暖严重威胁地区自然生态和人类生存环境,如何有效减少碳排放量,发展绿色低碳经济,成为世界各国关注的焦点<sup>[1-2]</sup>。党的十九大报告明确提出,建立健全绿色低碳循环发展的现代化经济体系,努力形成人与自然和谐共生的新发展格局。并在 2020 年 9 月 22 日的第七十五届联合国大会上提出“双碳”目标。大量研究表明,土地利用变化带来的碳排放量仅次于化石燃料燃烧产生的碳排放量<sup>[3-4]</sup>。近 20 a 来,中国处于新型城镇化与工业化快速发展阶段,城镇化的快速发展将导致土地利用/土地覆被产生显著变化。因此,研究土地利用变化碳排放,对指导区域实现“双碳”目标、发展绿色低碳经济和改善生态环境具有重要意义。

目前国内外学者对土地利用碳排放的研究主要集中在土地利用碳排放的测算及空间变化特征<sup>[5-6]</sup>、土地利用碳排放的机理研究<sup>[7-8]</sup>、碳排放效率<sup>[9-10]</sup>、碳排放与经济增长的关系<sup>[11-12]</sup>等方面。在研究尺度上,研究者多从省域<sup>[5,13]</sup>、市域等<sup>[14-15]</sup>较大尺度上展开研究,不同区域土地利用变化及经济发展水平的差异,导致碳排放效应也不同<sup>[16]</sup>。在影响因素研究方面大多采用 LMDI 模型<sup>[17-18]</sup>、STIRPAT 模型<sup>[19-20]</sup>、Kaya 恒等式<sup>[8]</sup>和灰色关联模型等<sup>[21]</sup>方法。LMDI 方法将碳排放量的影响因素进行乘积分解,通过权重来测算因素的重要程度,被广泛应用。如范建双等<sup>[22]</sup>从全要素的视角研究了土地利用碳排放效率。综上所述,土地利用碳排放研究已逐渐成熟,但忽略了区域内差异及城市功能群格局对土地利用变化碳排放强度变化的影响,以县域作为研究单元分析某一区域土地利用碳排放的研究较为缺乏。另外,土地利用碳排放的空间变化特征主要以行政区划为评价单元,不能够充分揭示碳排放的空间分布特征,对于国土空间分区规

划和土地低碳利用模式的构建起不到实际指导意义。

九江市位于江西省最北部,地处长江、鄱阳湖、京九铁路三大经济开发带交叉点,滨江傍湖,长江过境长度 151 km,是长江经济带中重要节点城市,也是东部沿海开发向中西部推进的过渡地带,被定位为江西省区域合作创新示范区。对维护长江、鄱阳湖区经济稳定发展,守住长江中下游生态屏障,保护鄱阳湖“一湖清水”具有重要作用。继 2021 年 4 月《“十四五”长江经济带发展实施方案》提出生态环保、绿色低碳等重大任务之后。九江市也于 2021 年 8 月正式发布《九江市绿色低碳发展行动计划》,提出到 2025 年,努力把九江打造成长江经济带绿色低碳发展示范城市,形成可复制、可推广的绿色低碳发展“九江模式”。因此,本文基于县域尺度,以江西省九江市为研究区,通过测算 2000—2020 年土地利用下的碳排放量,分析碳排放变化规律以及区域内的差异,利用 LMDI 模型解析空间差异的影响因素,并从网格化的视角研究土地利用碳排放风险,以期为九江市区域内差异化制定碳减排政策、构建低碳土地利用模式和生态文明建设提供理论依据。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

九江市地处江西省北部,东经 113°57′—116°53′,北纬 28°47′—30°06′,东西 270 km,南北 140 km,是长江经济带的重要节点城市,也是中国东部沿海地区经济社会发展向中西部推进的重要过渡地区。全市下辖 7 县(修水、武宁、永修、德安、都昌、湖口、彭泽),3 区(浔阳、濂溪、柴桑),3 个省辖县级市(瑞昌、共青城、庐山),2020 年末,全市年末常住人口数为 4.60

$\times 10^6$  人,城镇化率为 61.18%,生产总值为  $3.24 \times 10^{11}$  元,能源消费总量  $1.46 \times 10^7$  t 标准煤,居于全省第二。规模以上工业能源消费量由 2010 年的  $5.74 \times 10^6$  t 标准煤上升到 2020 年的  $1.19 \times 10^7$  t 标准煤,分别占能源消费总量的 70.98% 和 81.24%,居于全省首位。九江市是江西省高能耗、重化工的老工业基地,作为长江经济带的重要节点城市,承载着东部发达地区向内地的产业转移,能源消费总量不断增加,建设用地的需求更为突出。

## 1.2 数据来源

九江市 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年 5 期土地利用栅格数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)开发的土地覆被分类数据集,空间分辨率为 1 km。社会经济数据来源于 2001, 2006, 2011, 2016, 2021 年《江西省统计年鉴》,2001, 2006, 2011, 2016, 2021 年《九江统计年鉴》及相应年份的九江市国民经济与社会发展统计公报。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用碳排放测算

土地利用碳排放的测算:采用不同地类面积乘于其碳排放系数,得出农用地及建设用地的碳排放量之和。农用地土地利用碳排放量主要包括耕地、林地、草地、水域、未利用地等。碳排放计算公式<sup>[23]</sup>为:

$$C_a = S_i \cdot V_i \quad (1)$$

式中: $C_a$  表示第  $i$  种土地利用类型的碳排放(t);  $S_i$  代表第  $i$  种土地利用类型的面积( $\text{hm}^2$ );  $V_i$  代表第  $i$  种土地利用类型的碳排放系数( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。其中, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , 分别表示耕地、林地、草地、水域和未利用地,考虑到这些利用方式的碳排在较长的时期内变化不大,因此采用赖力等研究的碳排放系数<sup>[6, 23-26]</sup>, 林地、草地、水域和未利用地的碳排放系数依次为 0.497, -0.601, -0.021, -0.253, -0.005  $\text{t}/\text{hm}^2$ 。

建筑用地为主要碳源,其碳排放量效应主要通过间接测算其所承担的由人类行为产生的碳排放量。在相关研究成果的基础上<sup>[26]</sup>, 本文重点考虑建设用地上能源消费和人类产生的碳排放。计算公式为<sup>[27]</sup>:

$$E_j = \sum_{j=1}^8 (e_j \times \theta_j \times \beta_j) + (P \times L) \quad (2)$$

式中: $E_j$  为建设用地碳排放量(t);  $e_j$  为第  $j$  种能源消耗量(t);  $\theta_j$  为第  $j$  种能源标准煤折算系数( $\text{t}/\text{t}$ );  $\beta_j$  为第  $j$  种能源的碳排放系数。各能源类型碳排放系数参考《中国能源统计年鉴》和《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》(表 1)。 $P$  为年末常住人口数,

$L$  为每人每年呼吸的碳排放量,为每人 0.079  $\text{t}/\text{a}$ <sup>[27]</sup>。

净碳排放量是土地利用直接和间接碳排放量汇总后的净碳排放量,计算公式为:

$$C = C_a + E_j \quad (3)$$

式中: $C$  为土地利用净碳排放量(t);  $C_a$  表示耕地碳排放和林地、草地、水域、未利用地的碳吸收量总和(t);  $E_j$  为建设用地碳排放量(t)。

表 1 各类能源标准煤换算系数和碳排放系数

Table 1 Standard coal conversion coefficient of energy and carbon emission coefficient

能源类型	折标准煤系数 <sup>①</sup>	碳排放系数 <sup>②</sup>
原煤	0.714 3	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
原油	1.428 6	0.585 7
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5
天然气	1.714 3	0.504 2

注:①数据来自《中国能源统计年鉴》;②数据来自《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。

### 2.2 碳排放风险指数计算

土地碳排放风险指数大小由评价单元内的各土地利用类型面积和其碳排放系数共同决定,碳排放风险指数越大说明单位区域内碳排放量越大,反之则越小<sup>[28-29]</sup>。计算公式为<sup>[28]</sup>:

$$C_{RI} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i V_i}{S} \quad (4)$$

式中: $C_{RI}$  为土地碳排放风险指数;  $S_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积( $\text{hm}^2$ );  $S$  为区域土地利用总面积( $\text{hm}^2$ );  $V_i$  为第  $i$  种土地利用类型的碳排放系数。建设用地的碳排放系数根据研究区建设用地碳排放量与建设用地面积的比值确定<sup>[28]</sup>。

### 2.3 影响因素分解模型

以往对土地利用碳排放影响因素的研究主要侧重于能源方面<sup>[18, 30]</sup>, 本文综合考虑了与土地利用碳排放相关的能源、经济、土地和人口等方面因素,从能源碳排放强度、能源消费强度、经济发展水平、土地利用效率和建设用地规模等 5 个方面建立了九江市土地利用碳排放影响因素指标。采用对数均值迪氏指数分解法(logarithmic mean divisia index method)<sup>[30]</sup>分析九江市土地利用碳排放的影响因素。

LMDI 分解模型如下:

$$C = \sum_{i=1}^5 \frac{C}{E} \times \frac{E}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{P} \times \frac{P}{S} \times S \quad (5)$$

式中： $C$  为土地利用净碳排放量( $10^4$  t)； $E$  为能源消费总量( $10^4$  t 标准煤)； $GDP$  为地区生产总值( $10^4$  元)； $P$  为常住人口数( $10^4$  人)； $S$  为建设用地面积( $hm^2$ )。

其中，设：

$$e = \frac{C}{E}; f = \frac{E}{GDP}; g = \frac{GDP}{P}; h = \frac{P}{S}; s = S \quad (6)$$

则土地利用净碳排放量可表示为以上各个因素的乘积，计算公式为：

$$C = \sum_{i=1}^5 e \times f \times g \times h \times s \quad (7)$$

式中： $e$  为单位能源消费的碳排放量，表示能源碳排放强度； $f$  为单位 GDP 的能源消耗量，表示能源消费强度； $g$  为人均 GDP，表示经济发展水平； $h$  为单位建设用地上的人口数量，表示土地利用效率； $s$  为建设用地面积，表示建设用地规模。本文将研究期初期的净碳排放量设为  $C^0$ ，第  $t$  期净碳排放量设为  $C^t$ 。则九江市土地利用净碳排放量的变化效应如公式(8)所示。

$$\begin{aligned} \Delta C &= C^t - C^0 \\ &= \sum_{i=1}^5 e^t \cdot f^t \cdot g^t \cdot h^t \cdot s^t - \sum_{i=1}^5 e^0 \cdot f^0 \cdot g^0 \cdot h^0 \cdot s^0 \\ &= \Delta C_e + \Delta C_f + \Delta C_g + \Delta C_h + \Delta C_s \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $\Delta C_e, \Delta C_f, \Delta C_g, \Delta C_h, \Delta C_s$  分别代表所选影响因素的贡献值( $e, f, g, h, s$ )，其表达式分别如公式(9)所示。

$$\begin{aligned} \Delta C_e &= \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot \ln \frac{e^t}{e^0}; \Delta C_f = \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot \ln \frac{f^t}{f^0}; \\ \Delta C_g &= \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot \ln \frac{g^t}{g^0}; \Delta C_h = \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot \ln \frac{h^t}{h^0}; \quad (9) \\ \Delta C_s &= \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot \ln \frac{s^t}{s^0}; \omega_i = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \end{aligned}$$

为进一步掌握各影响因素对九江市土地利用碳排放变动的贡献程度，各因素的贡献率计算过程如公式(10)所示。

$$\begin{aligned} D_e &= \frac{\Delta C_e}{\Delta C}; D_f = \frac{\Delta C_f}{\Delta C}; D_g = \frac{\Delta C_g}{\Delta C}; \\ D_h &= \frac{\Delta C_h}{\Delta C}; D_s = \frac{\Delta C_s}{\Delta C} \end{aligned} \quad (10)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 九江市土地利用碳排放时空特征分析

根据九江市 2000—2020 年能源消耗量及土地利用数据，计算得出各类型土地利用碳排放量(图 1，表 2)。20 a 间九江市碳源、碳汇及净碳排放量皆呈上升趋势。净碳排放量从  $4.82 \times 10^6$  t 增至  $1.81 \times 10^7$  t，

年均增长率为 13.75%。在碳源方面，20 a 间累计增加  $1.33 \times 10^7$  t，年均增长率为 12.13%。建设用地是九江市最主要碳源，从 2000 年的  $5.20 \times 10^6$  t 增加到 2020 年的  $1.85 \times 10^7$  t，占碳源总量的 95% 以上，而且呈递增的趋势。相反，耕地的碳源占比不到 5%，而且逐渐下降，从 2000 年的  $2.71 \times 10^5$  t 下降到 2020 年的  $2.59 \times 10^5$  t。在碳汇方面，20 a 间累计增加了  $9.50 \times 10^2$  t，年均增长率为 0.01%，林地是主要碳汇，占碳吸收量的 90% 以上，承担最主要的碳吸收作用。秦岩等<sup>[31]</sup>的研究也得出相似的结论。水域的碳吸收量介于 8.88%~9.37% 之间，并呈上升的趋势，草地和未利用地的碳吸收量不足 1%。而且林地、草地和未利用地的碳吸收量均呈下降的趋势，下降幅度分别为 0.36%，8.26%，37.69%。

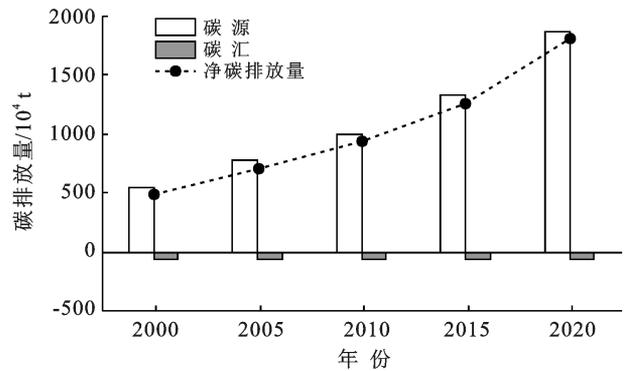


图 1 九江市 2000—2020 年土地利用净碳排放量变化

Fig.1 Net carbon emission of land use during 2000—2020 in Jiujiang City

表 2 九江市 2000—2020 年土地利用碳排放占比  
Table 2 Proportion of carbon emission of land use during 2000—2020 in Jiujiang City %

年份	碳源		碳汇			
	耕地	建设用地	森林	草地	水域	未利用地
2000	4.95	95.05	0.33	90.77	8.88	0.02
2005	3.47	96.53	0.32	90.77	8.90	0.02
2010	2.66	97.34	0.30	90.41	9.28	0.01
2015	1.97	98.03	0.30	90.36	9.33	0.01
2020	1.38	98.62	0.31	90.32	9.37	0.01

为了更加直观地对比区域间碳排放差异，利用自然断点法将九江市各县区的净碳排放量划分为 5 个等级(图 2)：微度排放区( $< 1.20 \times 10^4$  t)，低度排放区( $1.21 \times 10^4 \sim 1.90 \times 10^5$  t)，中度排放区( $1.90 \times 10^5 \sim 7.27 \times 10^5$  t)，高度排放区( $7.27 \times 10^5 \sim 1.72 \times 10^6$  t)，重度排放区( $> 1.72 \times 10^6$  t)。由图 2 可知，九江市土地利用碳排放量总体呈现“东北高西南低”的分布特征，县区间土地利用净碳排放量变化显著。除武宁、

都昌、德安、永修县和庐山、共青城市属于低度排放区外,其余县区均处于波动增长状态。武宁县由于森林覆盖率达 75.49%,一直起到碳汇的作用。瑞昌市和湖口县的碳排放量在研究区内大幅度增长,从低度碳排放区上升为高、重度碳排放区;而柴桑区和彭泽县碳排放量也呈上升趋势,但上升幅度相对较小,从低度排放区上升为中度排放区。在 2000—2005 年,除了浔阳、濂溪区经济相对较好,碳排放量占九江市净碳排放量的 94% 以上。其余大部分县区经济发展水平不高且差异小,土地利用净碳排放量差异不显著,但

湖口县和瑞昌市的碳排放量增长较快。2005 年以后,随着湖口县、瑞昌市社会经济的发展,土地利用碳排放量增长幅度大,特别是湖口县,碳排放量年增长率为 336.59%,碳排放量的比例由 2005 年的 1.57% 增长至 2020 年的 31.79%。到 2020 年,濂溪区、浔阳区、湖口县、瑞昌市的碳排放量占九江市净碳排放量的 96.08%,这 4 个县区均是沿着长江沿岸地区,且瑞昌港区、城西港区、城区港区、湖口港区同属九江港(在长江 22 个港口中货物吞吐量位于第 7),货物的吞吐量大,经济得以快速发展,进而导致碳排放量较高。

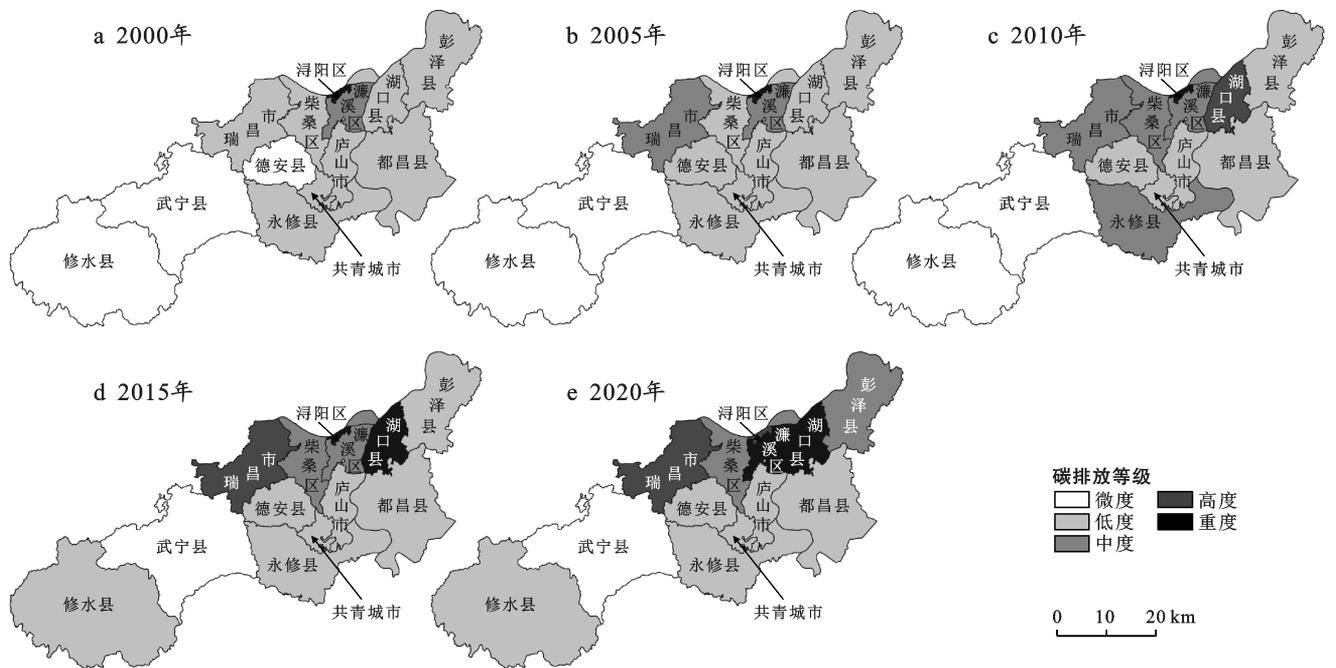


图 2 九江市 2000—2020 年土地利用净碳排放空间格局

Fig.2 Spatial pattern of net carbon emission of land use during 2000—2020 in Jiujiang City

### 3.2 九江市土地利用碳排放风险分析

为了更加直观展现九江市各县区土地利用碳排放风险状况,参考前人的研究成果<sup>[28-29]</sup>,结合研究区域的实际情况,从相对重要性的角度出发,对九江市的土地利用数据进行网格单元划分,以 1 km×1 km 的等间距共划分得出 20 839 个网格。并利用自然间断点法,将碳排放风险指数划分为 4 类等级(<0.20 为低风险区,0.21~0.82 为中风险区,0.83~1.88 为高风险区,1.89~3.03 为重风险区)<sup>[29]</sup>(表 3),得出九江市土地利用碳排放风险的空间分布格局(图 3)。

由表 3 可知,九江市土地利用碳排放风险总体偏低,20 a 间低风险区的网格数占总网格数的 90% 以上,但低风险区的网格数及其比例呈下降趋势,从 2000 年的 96.36% 下降到 2020 年的 89.52%。而九江市在 2000—2020 年的土地利用碳排放风险则呈增加趋势,中、高、重度风险区网格数比例都呈现出上升的

趋势,从 2000 年的 3.64% 增加到 2020 年的 10.48%,尤其是重度风险区网格数比例由 0 增长至 1.37%。从空间分布特征来看,九江市土地利用碳排放风险呈现出“东部高西部低”的空间分布特征,重度风险区逐渐向周边扩散,而低风险区却不断缩减,并逐渐向中度、高度、重度风险区转移(图 3)。低风险区要集中于修水、武宁、都昌、永修、彭泽县和瑞昌市,这 6 个县区的总网格数占九江市低风险区总网格数的 78.91%,尤其是武宁县和修水县,其比例为 41.99%,主要是因为该地区多为林地和草地等植被覆盖度高的地类,其中,武宁县和修水县森林覆盖率分别为 75.49% 和 72.8%,天然植被丰富,生态系统自我调节平衡能力强。中度风险区主要分布在瑞昌市的东北部、彭泽县的西北部和柴桑区的中北部地区,这 3 个县区的总网格数占九江市中度风险区总网格数的 47.66%,其中瑞昌市的桂林街道分布的中度风险区最为显著,彭泽

县在龙城镇和棉船镇比较明显,柴桑区的中度风险主要分布于城门乡。高度风险区主要位于浔阳区和濂溪区,两者的总网格数占九江市高度风险区总网格数的 61.33%,这两个市辖区以建设用地分布为主,工业

产业快速发展,能源消耗量大,导致土地利用碳排放较高。而重度风险区则主要分布于浔阳区、濂溪区和柴桑区,到 2020 年,这 3 个市辖区的总网格数占九江市重度风险区总网格数的 48.07%。

表 3 九江市 2000—2020 年土地利用碳排放风险网格数及比例

Table 3 Quantity and proportion of carbon emission risk grids of land use during 2000—2020 in Jiujiang City

风险等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	风险网格数	风险网格数比例/%								
低	20 078	96.36	19 583	93.99	19 393	93.07	19 116	91.74	18 656	89.52
中	684	3.28	1 118	5.37	1 164	5.59	1 258	6.04	1 508	7.24
高	75	0.36	106	0.51	206	0.99	323	1.55	390	1.87
重	0	0.00	29	0.14	74	0.36	141	0.68	285	1.37

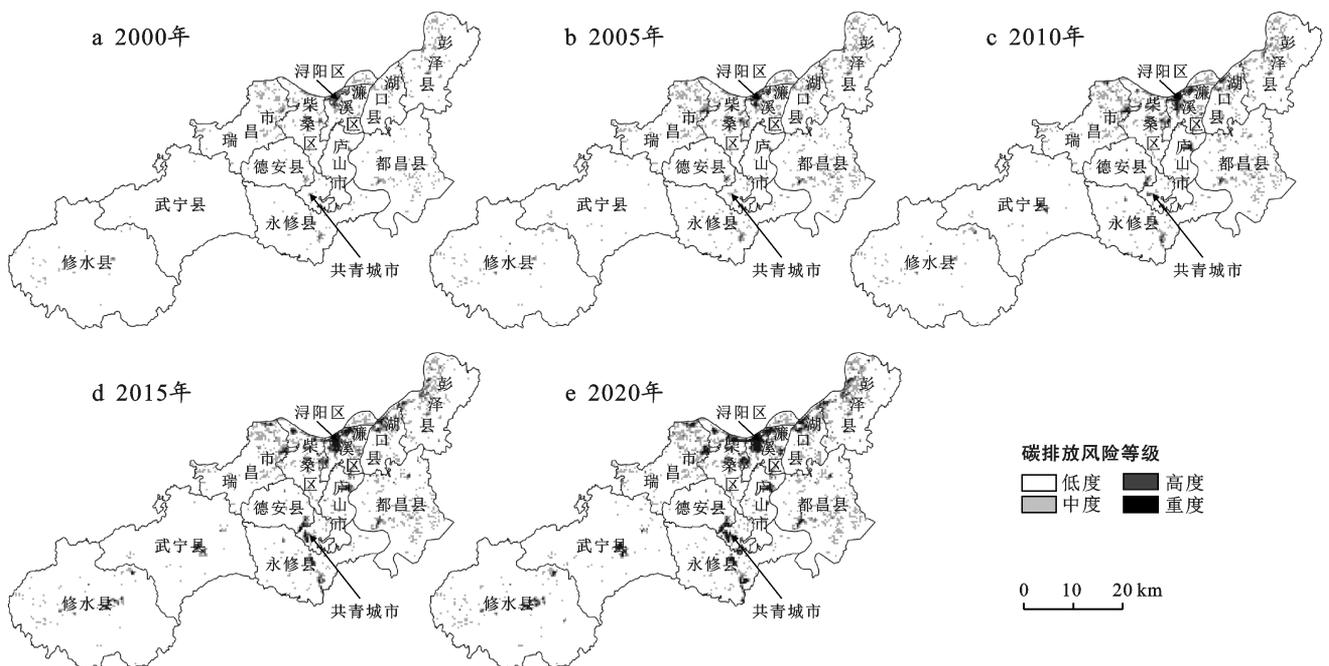


图 3 九江市 2000—2020 年土地利用碳排放风险空间格局

Fig.3 Spatial pattern of carbon emission risk of land use during 2000—2020 in Jiujiang City

### 3.3 九江市土地利用碳排放影响因素分析

采用 LMDI 分解法,基于公式(5)—(10)计算出能源碳排放强度、能源消费强度、土地利用效率、经济发展水平、建设用地规模对九江市土地利用碳排放的影响(表 4,图 4)。由表 4 和图 4 可知,经济社会发展水平和建设用地规模对九江市土地利用碳排放起到主要的正向促进作用。九江市的经济增长速度一直处于全省前列,地区生产总值从 2000 年的  $2.13 \times 10^9$  元增长至 2020 年的  $3.24 \times 10^{10}$  元,年均增长率为 71.02%。受经济高速发展影响,20 a 间九江市土地利用累计碳增量  $2.63 \times 10^7$  t,占碳排放增量的 76.43%。同时,建设用地规模随着区域经济的高速

发展不断扩大,九江市建设用地面积从 2000 年的  $283.60 \text{ km}^2$  增加到 2020 年的  $609.09 \text{ km}^2$ ,年均增长率达到 5.74%。建设用地规模累计增加了  $8.09 \times 10^8$  t 的碳排放量,占碳排放增长总量的 23.56%。

能源消费强度、土地利用效率以及能源碳排放强度则对土地利用碳排放起到抑制作用。九江市的能源消费强度从 2000 年的每万元产值 1.25 t 标准煤减少到 2020 年的 0.45 t 标准煤,年均减少率为 3.19%。受能源消费强度降低影响,碳排放减少量达  $1.08 \times 10^7$  t,占碳排放减少总量的 51.30%,表明能源消费强度已成为九江市土地利用碳排放量增加的主要抑制因素。在低碳转型发展的目标条件下,九江市能源和

产业的不断调整、新能源技术的开发使得能源利用效率得以普遍提高,从而土地利用碳排放大幅下降。李玲玉等<sup>[30]</sup>的研究也表明,能源强度效应对碳排放减小的贡献率达 85.96%。另外,土地利用效率累计减

少了  $8.25 \times 10^6$  t 的碳排放量,占碳排放减少总量的 39.13%,土地利用效率越高,对土地的生产活动所依赖的物资投入也就减少,从而土地利用碳排放量逐渐减少<sup>[32]</sup>。

表 4 九江市 2000—2020 年土地利用碳排放影响因素贡献值

年份	能源碳排放强度	能源强度	经济发展水平	土地利用效率	建设用地规模	综合效率
2000—2005	-100.02	-82.45	392.23	-7.67	28.10	230.18
2005—2010	-227.18	-268.14	705.31	-205.79	220.18	224.39
2010—2015	-70.34	-271.25	645.83	-284.35	306.53	326.41
2015—2020	195.79	-459.43	881.84	-327.05	254.51	545.67
累积贡献值	-201.76	-1 081.27	2 625.21	-824.87	809.33	1 326.65

注:“+”表示碳排放正向效应;“-”表示碳排放的负向效应。

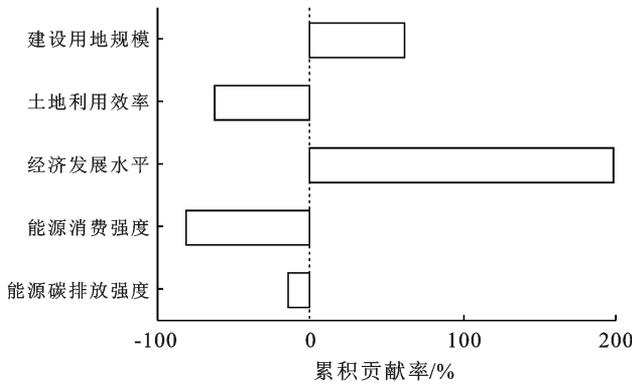


图 4 九江市 2000—2020 年土地利用碳排放影响因素累积贡献率

Fig.4 Accumulative contribution of carbon emission influence factors of land use during 2000—2020 in Jiujiang City

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文基于土地利用碳排放系数法,测算了 2000—2020 年九江市土地利用碳排放量,从网格化的视角出发,估算了土地利用碳排放风险,并运用 LDMI 模型,从能源碳排放强度、能源消费强度、土地利用效率、经济发展水平、建设用地规模等方面探讨土地利用碳排放的影响因素,揭示其时空演变特征并分析主要影响因素,对九江市构建绿色低碳的土地利用方式具有重要的现实意义。

2000—2020 年九江市土地利用净碳排放量呈现持续增长的态势,年均增长率达 13.75%,主要是因为工业化和城市化的快速发展以及人口的不断增长,导致建设用地扩张和能源消耗的增长,这是碳排放量增长的直接原因<sup>[22,29]</sup>,20 a 间九江市建设用地面积增长了 325.49 km<sup>2</sup>,年平均增长率达到 5.74%,其中耕地面积减少了 407.96 km<sup>2</sup>,有 56.99%转出为建设用地

(图 5)。李小康等<sup>[8]</sup>的研究也表明,建设用地总量每增加 1%会引起净碳排放量增加 3.99%。Shen 等<sup>[33]</sup>的研究也表明城市碳排放高的主要原因是建设用地的快速扩张和农业用地的不合理利用,由此促进了净碳排放量的快速增加。九江市土地利用碳排放风险也随着生产建设活动的开展、能耗的增加而增加。中高风险区也主要分布在湖口县、浔阳区、濂溪区、柴桑区、瑞昌市和彭泽县等长江流域沿岸城市,而森林覆盖率较高的区域,如武宁县和修水县主要起到碳汇的作用,土地利用碳排放风险低。Chi 等<sup>[34]</sup>的研究表明,提高城市绿地指数,森林覆盖率,能很好的增加碳汇。因此,在“双碳”背景下,政府在制定碳减排目标时,应综合考虑各县区发展的差异与土地利用特点,应积极寻求降碳措施,加快退耕还林、荒山造林等重大工程,增加碳汇面积,从而减少碳排放量,综合提升长江流域及鄱阳湖流域的生态承载力。

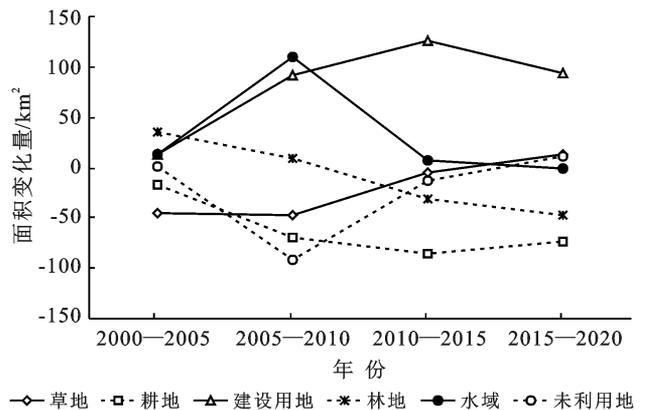


图 5 九江市 2000—2020 年土地利用变化

Fig.5 Land use change during 2000—2020 in Jiujiang City

另外,经济发展水平是九江市土地利用碳排放量增加的最主要促进因素,这与李玲玉等<sup>[30]</sup>的研究结论

一致。九江市是长江经济带重要节点城市和副省域中心城市,九江港又是长江 5 个主枢纽港之一,其 GDP 的快速增长势必会引来更多的人才、资金等生产要素涌入,最终形成人口和产业的大量聚集,导致各种产品和生活资料的消耗不断增加,从而促进了土地利用碳排放量的增加。当建设项目用地规模增加后,所承担的所有人类社会活动如工业、生活和能源消耗等都大大增加,并由此造成了土地利用碳排放量的急剧增加<sup>[35]</sup>。由于建设用地承担了几几乎所有的人类活动,因此建设用地的规模几乎是决定城市碳排放量的主要因素<sup>[31]</sup>。能源消费强度体现在单位 GDP 的能源消耗量、能源结构及利用效率等相关指标上,对碳排放的累计贡献率达 81.50%,表明降低单位 GDP 能耗、提高能源利用效率、优化能源结构以及开发新能源等是抑制碳排放量增长的有力措施,“十三五”期间九江市能耗年均下降 5.13%。但“十三五”期间九江市土地利用净碳排放量持续增长,说明能源消费强度的降低、土地利用效率的提高对碳排放量的抑制作用还比较薄弱,这就需要推动绿色低碳示范项目建设,探索建成九江低碳绿色综合能源利用体系,并进一步优化产业结构,提高土地利用效率,防止碳汇用地大面积向碳源用地转变。

## 4.2 结论

(1) 2000—2020 年,九江市碳源量、碳汇量和净碳排放量均呈上升趋势,建设用地为主要碳源,占碳源总量的 95%以上,耕地占碳源总量的 5%。林地对碳汇的贡献率最大,达到 90%左右,水域为次要碳汇,草地和未利用地发挥着弱碳汇作用。从空间分布特征看,各县区市的净碳排放量差异较大,湖口县、浔阳区、濂溪区、柴桑区、瑞昌市和彭泽县等长江流域沿岸城市是碳排放高值区。

(2) 在土地利用碳排放风险方面,九江市土地利用碳排放风险水平整体偏低,占 90%以上,但逐渐向中度、高度和重度风险区转移。在空间分布上碳排放风险呈现出“东部高,西部低”的空间分布特征。低风险区主要分布在武宁县和修水县,中度风险区主要分布在都昌县、瑞昌市和彭泽县,高度风险区主要分布在濂溪区、柴桑区和彭泽县,而重度风险区集中于濂溪区、浔阳区和柴桑区。

(3) 在土地利用碳排放影响因素方面,经济发展水平与建设用地规模是土地利用碳排放量增加的正向促进因素,其中经济发展水平累积实现碳增量  $2.63 \times 10^7$  t,占到碳排放量增加总量的 76.43%。能源消费强度、能源碳排放强度与土地利用效率是土

利用碳排放量增加的负向抑制因素,其中能源消费强度累积实现碳减量  $1.08 \times 10^7$  t,占到碳排放减少总量的 51.30%,为主要负向抑制因素。

## [参 考 文 献]

- [1] 刘纪远,邵全琴,延晓冬,等.土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探[J].地球科学进展,2011,26(10):1015-1022.
- [2] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere [J]. Ecological Monographs, 1983, 53(3): 235-262.
- [3] de Campos C P, Muylaert M S, Rosa L P. Historical CO<sub>2</sub> emission and concentrations due to land use change of croplands and pastures by country [J]. Science of the Total Environment, 2005, 346(1/2/3): 149-155.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孙赫,梁红梅,常学礼,等.中国土地利用碳排放及其空间关联[J].经济地理,2015,35(3):154-162.
- [7] 李颖,黄贤金,甄峰.江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J].农业工程学报,2008,24(S2):102-107.
- [8] 李小康,王晓鸣,华虹.土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J].生态经济,2018,34(1):14-19.
- [9] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898-5907.
- [10] 张苗,甘臣林,陈银蓉.基于 SBM 模型的土地集约利用碳排放效率分析与低碳优化[J].中国土地科学,2016,30(3):37-45.
- [11] 黄鑫,邢秀为,程文仕.土地利用碳排放与 GDP 含金量的脱钩关系及驱动因素[J].地域研究与开发,2020,39(3):156-161.
- [12] 王刚,张华兵,薛菲,等.成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究[J].自然资源学报,2017,32(7):1170-1182.
- [13] 马远,刘真真.黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J].生态经济,2021,37(7):35-43.
- [14] 文枫,鲁春阳.重庆市土地利用碳排放效应时空格局分异[J].水土保持研究,2016,23(4):257-262.
- [15] 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.
- [16] 苑韶峰,唐奕钰.低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J].经济地理,2019,39(2):190-198.
- [17] 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.

- [18] 冯杰,王涛.中国土地利用碳排放演变与影响因素分析[J].软科学,2016,30(5):87-90.
- [19] 张勇,张乐勤,汪应宏,等.安徽省池州市土地利用碳排放演变及其影响因素[J].中国农业大学学报,2014,19(2):216-223.
- [20] 阿如早,牡丹,苏德苏日古格,等.内蒙古多伦县土地利用碳排放及其影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(4):17-22.
- [21] 严慈,侯兰功.基于灰色理论的陕西省土地利用变化及其碳排放研究[J].西安理工大学学报,2021,37(1):25-31.
- [22] 范建双,虞晓芬,周琳.南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J].地理研究,2018,37(11):2177-2192.
- [23] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].江苏 南京:南京大学,2010.
- [24] 何勇,姜允迪,丹利,等.中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M].北京:气象出版社,2006.
- [25] 石洪听,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.
- [26] 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研究[J].环境科学研究,2022,35(10):2312-2321.
- [27] 李璐,董捷,徐磊,等.功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区:以武汉城市圈为例[J].自然资源学报,2019,34(5):1003-1015.
- [28] 汤峰,殷彦玲,张蓬涛,等.基于土地利用变化的高阳县生态系统服务价值和碳排放风险研究[J].水土保持研究,2019,26(4):265-271.
- [29] 张杰,陈海,刘迪,等.基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J].西北大学学报(自然科学版),2022,52(1):21-31.
- [30] 李玉玲,李世平,祁静静.陕西省土地利用碳排放影响因素及脱钩效应分析[J].水土保持研究,2018,25(1):382-390.
- [31] 秦岩,於冉,於忠祥,等.2000—2018年长三角中心区土地利用碳排放强度的时空特征[J].河南农业大学学报,2021,55(1):132-140.
- [32] Abdollahi A, Pradhan B, Shukla N, et al. Deep learning approaches applied to remote sensing datasets for road extraction: A state-of-the-art review [J]. Remote Sensing, 2020,12(1444):1-22.
- [33] Shen Xinzhe, Huang Lei, Zhu Jing, et al. Retraction Note: Relationship between land use carbon emission and economic growth based on GIS [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021,14(457):1-16.
- [34] Chi Mingmin, Plaza A, Benediktsson J A, et al. Big data for remote sensing: Challenges and opportunities [J]. Proceedings of the IEEE, 2016,104(11):2207-2219.
- [35] 鲍莹,张安明.重庆合川区土地利用碳排放的效应及驱动因素[J].浙江农业科学,2021,62(2):440-444.

(上接第 340 页)

- [29] Tang Xinyi, Liu Shuguang, Liu Juxiu, et al. Effects of vegetation restoration and slope positions on soil aggregation and soil carbon accumulation on heavily eroded tropical land of Southern China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010,10(3):505-513.
- [30] 芦琛,蒋小董,吴冠宇,等.黄土丘陵区不同退耕林地表土水溶性有机质含量及光谱特征差异[J].林业科学,2021,57(11):13-23.
- [31] 蒋腊梅,白桂芬,吕光辉,等.不同管理模式对干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):15-21.
- [32] 陈曦,王改玲,刘焕焕,等.黄土高原吕梁山不同撂荒年限土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征[J].土壤,2021,53(2):375-382.
- [33] 谷忠元,康黎,罗梦娟,等.湘东地区典型土壤团聚体稳定性的影响因素[J].水土保持通报,2018,38(5):58-63.
- [34] 黎宏祥,王彬,王玉杰,等.不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(5):84-91.
- [35] 莫彬,曹建华,徐祥明,等.岩溶山区不同土地利用方式对土壤活性有机碳动态的影响[J].生态环境,2006,15(6):1224-1230.
- [36] 闫清华,张风华,谭斌,等.不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J].土壤学报,2013,50(6):1183-1190.