

# 沱江流域土地利用碳平衡与人类活动强度的关系

张文英<sup>1,2</sup>, 高雪松<sup>1,2</sup>, 王启<sup>1,2</sup>

(1.四川农业大学 资源学院,四川 成都 610000; 2.自然资源部 耕地资源调查监测与保护利用重点实验室,四川 成都 610000)

**摘要:** [目的] 研究土地利用碳平衡与人类活动强度间的协同关系,为沱江流域的区域协同碳减排规划及实现中国“碳达峰、碳中和”目标提供参考。[方法] 基于2000—2020年土地利用及社会经济数据,使用碳排放经济贡献系数、碳生态承载系数、人类活动强度指标,耦合协调度模型及回归分析方法,核算了沱江流域土地利用碳排放量并分析了土地利用碳平衡与人类活动强度的时空演变特征及其协同关系。[结果] 研究表明,2000—2020年沱江流域碳排放量增加了 $5.13 \times 10^7$  t,其中建设用地碳排放量占90%以上;碳吸收量变化不大,主要来自林地,呈现先减后增的趋势;净碳排放增长率呈下降趋势。各区县的土地利用碳平衡协调度均在提升,但70%以上的区域处于失调衰退状态。沱江流域人类活动强度整体处于中等强度水平,空间上从北向南呈现“低—高—低—高”的格局。[结论] 人类活动强度与人均GDP、人均碳排放均存在显著的正相关关系。土地利用碳平衡协调度与人类活动强度的负相关关系随着技术进步与能源利用效率的提高而降低。提高碳汇能力与碳生产力是改善区域土地利用碳平衡协调水平的有效途径。

**关键词:** 土地利用; 人类活动强度; 碳平衡; 沱江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0349-08

中图分类号: F301.24, X171.1

**文献参数:** 张文英, 高雪松, 王启. 沱江流域土地利用碳平衡与人类活动强度的关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 349-356, 365. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.039; Zhang Wenying, Gao Xuesong, Wang Qi. Relationship between land use carbon balance and human activity intensity in Tuojiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 349-356, 365.

## Relationship Between Land Use Carbon Balance and Human Activity Intensity in Tuojiang River Basin

Zhang Wenying<sup>1,2</sup>, Gao Xuesong<sup>1,2</sup>, Wang Qi<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu,

Sichuan 610000, China; 2. Key Laboratory of Investigation and Monitoring, Protection and

Utilization for Cultivated Land Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610000, China)

**Abstract:** [Objective] The synergistic relationship between land use carbon balance and human activity intensity were studied in order to provide a reference for regional collaborative carbon emission reduction planning in the Tuojiang River basin, and thereby meet the goal of “carbon peak and carbon neutrality” in China. [Methods] Using land use and socio-economic data from 2000 to 2020, carbon emission economic contribution coefficient, carbon ecological carrying coefficient, human activity intensity indicators, a coupled coordination model, and regression analysis, we calculated carbon emissions from land use in the Tuojiang River basin. We then analyzed the spatiotemporal evolution characteristics and synergistic relationship between land use carbon balance and human activity intensity. [Results] Carbon emissions in the Tuojiang River basin increased by  $5.13 \times 10^7$  t from 2000 to 2020, with construction land accounting for over 90% of carbon emissions. The small change in carbon absorption mainly resulted from forest land showing a change pattern of initially decreasing and then increasing. The growth rate of net carbon emissions showed a downward trend. The coordination of land use carbon balance in each district and county was improving, but more than 70% of the region was in a state of imbalance and decline. The overall intensity of human activities in the Tuojiang River basin was at a moderate level, with a spatial pattern of “low-high-low-high” from north to south. [Conclusion] There was a significant positive correlation between human activity intensity and per capita

收稿日期: 2022-10-27

修回日期: 2023-02-06

资助项目: 四川省科技厅国际合作项目“沱江流域近百年农田土壤有机碳动态模拟研究”(2021YFH0121)

第一作者: 张文英(1997—), 女(彝族), 四川省凉山州人, 硕士研究生, 研究方向为土地可持续利用。Email: 2232039864@qq.com。

通信作者: 高雪松(1980—), 男(汉族), 重庆市丰都区人, 博士, 教授, 主要从事土地资源与乡村发展研究。Email: Gxs80@126.com。

GDP and per capita carbon emissions. The negative correlation between land use carbon balance coordination and human activity intensity decreased with technological progress and increased energy utilization efficiency. Improving carbon sequestration capacity and carbon productivity is an effective way to improve the coordination level of regional land use carbon balance. The results of this study provide a reference for regional collaborative carbon emission reduction planning in the Tuojiang River basin.

**Keywords:** land use; intensity of human activity; carbon neutral; Tuojiang River basin

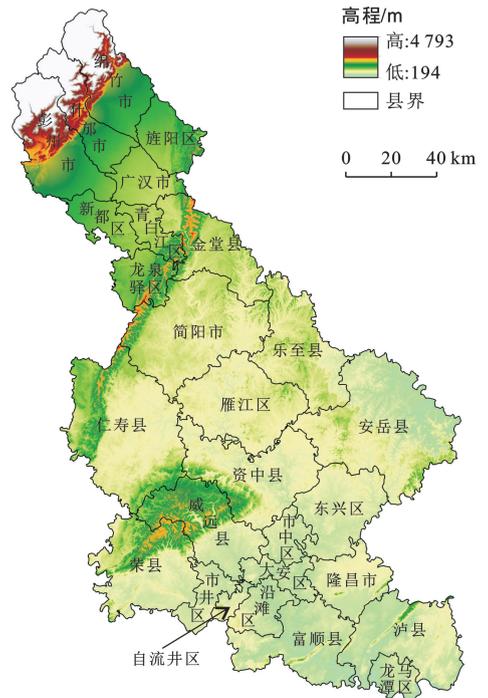
土地利用变化是人类各项社会经济活动作用于陆地表层的一种综合反应<sup>[1]</sup>。人类通过森林砍伐、农田管理、城镇建设等活动改变土地覆被与土地利用。碳平衡包括碳源(即碳排放)与碳汇(即碳固存)。在长时间尺度上,自然生态系统的碳源与碳汇是基本平衡的,但人类活动的干扰会改变陆地表层覆被状况,从而直接或间接地影响陆地生态系统与大气之间的碳循环过程<sup>[2]</sup>。IPCC 在《气候变化与土地特别报告》中指出,2007—2016 年土地利用活动排放的温室气体约占全球人为温室气体净排放总量的 23%<sup>[3]</sup>。土地利用已成为全球温室气体排放增长的重要因素<sup>[4]</sup>,人类活动也成为引起土地利用变化和温室气体排放增加的主因<sup>[5]</sup>。因此,理解人类活动与土地利用碳平衡的关系有利于实现土地利用可持续管理,进而减缓土地利用引起的温室气体排放的增长。

目前,国内外基于土地利用碳排放核算的碳平衡研究主要包括:时空演变分析、驱动机制研究、碳减排空间规划与分区<sup>[6]</sup>。碳平衡的估算方法主要有模型估算法、样地清查法、基于遥感数据的宏观估测及涡度和箱法观测法<sup>[7]</sup>。研究尺度包括国家<sup>[8-9]</sup>、省<sup>[10-12]</sup>、城市及城市群<sup>[1,13-14]</sup>、流域<sup>[15-16]</sup>、县域<sup>[17]</sup>等不同层次。在表征人类活动对陆地表层的干扰程度时,不同土地利用类型往往使用不同的指标量化其利用强度。Xia Chang 等<sup>[18]</sup>使用容积率(FAR)和建筑物覆盖率(BCR)计算城市土地利用强度;Tim 等<sup>[19]</sup>则定性描述为“未受干扰的生境”“轻度使用生境”及“密集使用的栖息地”;Jian Li 等<sup>[20]</sup>使用种植频率作为农业用地强度的衡量标准;刘纪远等<sup>[21]</sup>创建了基于土地利用结构和数量的土地利用程度综合指数。由于以上指标算法缺乏普适性,使得各区域研究结果缺乏可比性。另一方面,大部分的研究主要探讨人类活动与土地利用碳排放量间的关系,少有研究探讨土地利用碳平衡协调状态与人类活动间的联系。沱江流域是长江上游生态屏障,也是重要的粮食基地,对其进行碳平衡分析对于实现我国“碳达峰、碳中和”愿景目标有着重要意义。因此,本文以沱江流域的县级行政单元为研究对象,基于沱江流域土地利用碳排放核算结果,采用徐勇等<sup>[1]</sup>提出的人类活动强度指标以量化人类活动对陆地生态系统的干扰程度,基于耦合协调度模型构建土地利用碳平衡协调度,进而总结流域尺度

土地利用碳平衡及人类活动强度的时空特征,以期探讨土地利用碳平衡与人类活动强度间的协同关系,为沱江流域的区域协同碳减排规划提供参考。

## 1 研究区概况

沱江是长江的一级支流,是四川省腹部地区的重要河流之一,发源于德阳市绵竹市清平镇。流域地理坐标为东经 103°38′—105°50′,北纬 27°50′—31°41′。河流全长 638 km,流域面积为 27 840 km<sup>2</sup>,地势自西北向东南倾斜,年径流量约为 3.51×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>。沱江流域属亚热带季风性湿润气候,多年平均气温在 17.1℃;流域内多年平均降水量为 1 010 mm,其中上游山区为 1 200~1 700 mm,成都平原区为 850~1 100 mm,中下游丘陵区为 840~1 150 mm<sup>[22]</sup>。境内土地肥沃,耕地集中,交通发达,是四川省重要的工业集聚发展区和农业产区。本文依据《沱江绿色发展经济带建设总体方案》剔除流域面积占行政区划面积比例不足 30%的区县,划定 27 个区县为研究区(图 1)。



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统川S[2021]00050号标准地图校准制作。下同。

图 1 沱江流域区域地形图

Fig.1 Topographic map of Tuojiang River basin region

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

2000—2020年土地利用数据来源于分辨率为30 m的CLCD栅格数据集<sup>[23]</sup>;DEM数据采用美国国家航空航天局提供的30 m分辨率的SRTM产品(<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>);GDP、人口、各产业产值等社会经济统计数据来源于《四川统计年鉴》及各市州统计年鉴;单位GDP能耗数据来源于《中国能源统计年鉴》。依据中国土地利用现状分类标准(GB/T21010-2017)将栅格数据集重分类为建设用地、耕地、林地、水域、草地、未利用地6类。为增强不同时期经济数据的可比性,单位GDP能耗、各县市GDP和产业产值均按照2000年的可比价格进行计算。

### 2.2 碳排放测算

据相关参考文献<sup>[24-25]</sup>,基于植被、土壤及水域的碳吸收作用<sup>[2]</sup>,本文将林地、草地、水域、未利用地等受人类活动影响较小的地类归为碳汇,而受人类活动影响较大的建设用地归为碳源<sup>[13]</sup>。由于从10 a以上的尺度来看,农作物碳吸收量对农田生态系统碳净排放的影响应视为零<sup>[7]</sup>,因此本文将耕地归为碳源。

土地利用碳排放分为直接碳排放和间接碳排放。耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放量为直接碳排放,采用基于土地利用面积的排放系数法测算,根据沱江流域的地形地貌及气候特征,耕地、林地、草地、水域、未利用地的排放系数分别为:0.047 9<sup>[24]</sup>, -0.581<sup>[26]</sup>, -0.021<sup>[27]</sup>, -0.025 3<sup>[25]</sup>, -0.000 5 kg/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[7]</sup>。

$$E_k = \sum e_i = \sum T_i \cdot \delta_i \quad (1)$$

式中: $E_k$ 为直接碳排放量; $e_i$ 为不同土地利用类型产生的碳排放量; $T_i$ 为各土地利用类型面积; $\delta_i$ 为各土地利用类型的碳排放(吸收)系数,排放为正,吸收为负。

建设用地所承载的人为碳排放为间接碳排放,主要来源于第二、三产业<sup>[28]</sup>,由于各县市的能源消耗数据难以获取,参考相关文献<sup>[29]</sup>,依据单位GDP能耗和第二、三产业产值对建设用地碳排放量进行估算。计算公式如下:

$$E = \text{GDP}' \times H \times K \quad (2)$$

式中: $E$ 为建设用地碳排放量; $\text{GDP}'$ 为第二产业和第三产业产值(万元); $H$ 为单位GDP能耗(t/万元)(以标准煤计); $K$ 为煤炭消费的碳排放系数,本文取值0.755 9(t/t)<sup>[8]</sup>。

### 2.3 人类活动强度

本文采用人类活动强度(HAILS, human activity intensity of land surface)表征沱江流域2000—2020年人类对陆地表层改造、开发利用程度。陆地表层人类活动强度的计算公式<sup>[1]</sup>如下:

$$\text{HAILS} = \frac{S_{\text{CLE}}}{S} \times 100\% \quad (3)$$

$$S_{\text{CLE}} = \sum_{i=1}^n (\text{SL}_i \cdot \text{CI}_i) \quad (4)$$

式中:HAILS为陆地表层人类活动强度; $S_{\text{CLE}}$ 为建设用地当量面积; $S$ 为区域总面积; $\text{SL}_i$ 为第*i*种土地利用/覆被类型的面积; $\text{CI}_i$ 为第*i*种土地利用/覆被类型的建设用地当量折算系数; $n$ 为区域内土地利用/覆被类型数。

### 2.4 碳平衡测算

2.4.1 碳排放经济贡献系数 碳排放经济贡献系数(economy contributive coefficient, ECC)用于从经济利益的角度衡量区域碳排放量的差异性,反映了区域碳生产力的大小<sup>[17]</sup>。计算公式如下:

$$\text{ECC} = \frac{G_i/G}{C_i/C} \quad (5)$$

式中: $G_i$ 和 $C_i$ 分别表示某区县的GDP和碳排放量, $G$ 和 $C$ 分别表示沱江流域的GDP和碳排放总量;当 $\text{ECC} > 1$ 时,则表明该地区的经济贡献率大于碳排放的贡献率,说明具有较高的能源利用效率和碳生产力;反之,则表明该地区具有相对较低的能源利用效率和碳生产力。

2.4.2 碳生态承载系数 碳生态承载系数(ecological support coefficient, ESC)即表示某区县碳吸收占沱江流域的比例与该区县碳排放占沱江流域的比例的商,反映了区域碳汇能力的大小<sup>[17]</sup>。计算公式如下:

$$\text{ESC} = \frac{C_{\text{Ai}}/C_{\text{A}}}{C_i/C} \quad (6)$$

式中: $C_{\text{Ai}}$ 和 $C_i$ 分别表示某县域单元的碳吸收量和碳排放量, $C_{\text{A}}$ 和 $C$ 分别表示中原经济区的碳吸收和碳排放总量。若 $\text{ESC} > 1$ ,则表明该地区碳吸收的贡献率大于碳排放的贡献率,说明具有相对较高的碳补偿率;若 $\text{ESC} < 1$ ,则表明该地区碳吸收的贡献率小于碳排放的贡献率,说明具有较低的碳补偿率。

2.4.3 耦合协调度 本文依据ESC与ECC两个指标的特性,基于耦合协调度模型<sup>[30]</sup>构建土地利用碳平衡协调度以表征区域土地利用碳平衡状态。计算公式为:

$$C = \sqrt{[1 - (U_2 - U_1)] \times \frac{U_1}{U_2}} \quad (7)$$

$$T = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 \quad (\alpha_1 + \alpha_2 = 1) \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

式中:  $U_1$  和  $U_2$  为 ESC 与 ECC 标准化后的值且  $U_2 > U_1$ 。  $C$  为耦合度, 当各子系统越离散,  $C$  值越低;  $T$  为综合协调指数;  $\alpha_1, \alpha_2$  均取值 0.5;  $D$  为耦合协调度。对土地利用碳平衡耦合协调度划分等级<sup>[31]</sup>(见表 1)。

表 1 协调等级及协调发展度的划分标准

Table 1 Classification criteria for coordination level and coordination development degree

区间	[0,0.1)	[0.1,0.2)	[0.2,0.3)	[0.3,0.4)	[0.4,0.5)	[0.5,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1)
协调等级	极度失调	严重失调	中度失调	轻度失调	濒临失调	勉强协调	初级协调	中级协调	良好协调	优质协调
颜色										
大类	失调衰退类				过渡发展类		协调发展类			

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用碳平衡时空演变特征

3.1.1 土地利用碳排放 由表 2 可知, 2000—2020 年, 沱江流域净碳排放量由  $8.17 \times 10^6$  t 增至  $5.91 \times 10^7$  t, 增幅为 623.43%, 年均增长  $2.55 \times 10^6$  t; 碳排放量由  $9.74 \times 10^6$  t 增至  $6.10 \times 10^7$  t。其中, 建设

用地碳排放量占 90% 以上, 增幅为 604.33%; 而耕地碳排放量在不断降低, 降幅为 4.87%。碳吸收量则变化不大, 主要来自林地, 碳吸收总量随林地面积变化而呈现先减后增的趋势。人均碳排放在不断增加, 2020 年的人均碳排放量是 2000 年的 7.01 倍。单位 GDP 碳排放则以 2005 年为界, 呈现先增后减的趋势。沱江流域的能源利用效率在不断提高。

表 2 2000—2020 年沱江流域土地利用碳排放及变化趋势

Table 2 Trends of land use carbon emissions and changes in Tuojiang River basin from 2000 to 2020

年份	碳排放总量/ 10 <sup>4</sup> t		碳源/10 <sup>4</sup> t		碳吸收总量/ 10 <sup>4</sup> t		碳汇/10 <sup>4</sup> t			净碳排放总量/ 10 <sup>4</sup> t		单位 GDP 排放 量(t/10 <sup>4</sup> 元)	人均排放量 (t/人)
	建设用地	耕地	林地	草地	水域	未利用地	净碳排放总量	单位 GDP 排放	人均排放量				
2000	973.87	849.68	124.19	-156.40	-155.40	-0.22	-0.78	0.00	817.47	0.81	0.40		
2001	1 038.32	913.69	124.63	-154.11	-153.07	-0.22	-0.81	0.00	884.21	0.81	0.43		
2002	1 152.27	1 027.58	124.69	-152.42	-151.38	-0.22	-0.82	0.00	999.85	0.83	0.49		
2003	1 366.06	1 241.12	124.93	-148.00	-146.96	-0.22	-0.82	0.00	1 218.06	0.90	0.60		
2004	1 647.26	1 522.38	124.88	-146.97	-145.92	-0.22	-0.83	0.00	1 500.29	0.97	0.73		
2005	1 928.87	1 804.01	124.85	-145.29	-144.22	-0.22	-0.86	0.00	1 783.57	1.01	0.87		
2006	2 176.84	2 052.04	124.80	-144.78	-143.70	-0.22	-0.86	0.00	2 032.07	1.01	0.97		
2007	2 434.58	2 309.85	124.73	-143.41	-142.32	-0.22	-0.87	0.00	2 291.17	0.99	1.10		
2008	2 531.32	2 406.94	124.38	-145.15	-144.03	-0.22	-0.90	0.00	2 386.17	0.94	1.14		
2009	2 843.02	2 719.13	123.89	-147.39	-146.23	-0.23	-0.93	0.00	2 695.63	0.92	1.28		
2010	3 265.64	3 142.58	123.06	-154.03	-152.84	-0.24	-0.95	0.00	3 111.61	0.91	1.47		
2011	3 770.97	3 648.45	122.52	-156.70	-155.49	-0.24	-0.97	0.00	3 614.27	0.91	1.70		
2012	4 193.55	4 071.32	122.23	-158.30	-157.10	-0.25	-0.95	0.00	4 035.25	0.89	1.90		
2013	4 469.73	4 347.58	122.15	-152.69	-151.48	-0.25	-0.95	0.00	4 317.04	0.86	2.02		
2014	4 756.05	4 634.08	121.97	-153.74	-152.55	-0.25	-0.94	0.00	4 602.30	0.83	2.15		
2015	4 917.34	4 795.77	121.57	-157.06	-155.88	-0.25	-0.92	0.00	4 760.28	0.79	2.21		
2016	5 086.58	4 965.47	121.11	-161.41	-160.27	-0.25	-0.88	0.00	4 925.17	0.76	2.31		
2017	5 340.43	5 219.67	120.76	-164.33	-163.21	-0.25	-0.87	0.00	5 176.10	0.74	2.45		
2018	5 577.74	5 457.38	120.36	-167.08	-165.97	-0.24	-0.86	0.00	5 410.66	0.71	2.55		
2019	5 909.44	5 789.55	119.89	-170.87	-169.77	-0.24	-0.85	0.00	5 738.58	0.70	2.72		
2020	6 102.63	5 984.48	118.15	-188.83	-187.74	-0.24	-0.86	0.00	5 913.80	0.70	2.81		

由图 2 可知, 2000—2020 年沱江流域的净碳排放增长率在 2004 年达到峰值 23.17% 后便不断下降, 并在 2015 年达到最小值 3.43% 后保持较低的增速, 整体

呈下降趋势, 相关的碳减排措施取得了一定的成效。

如图 3 所示, 2000 年沱江流域整体处于低排放状态, 各区县碳排放量均大低于  $1.00 \times 10^6$  t; 2010 年

1/2 以上的区县碳排放量高于  $1.00 \times 10^6$  t; 2020 年沱江流域高排放区域进一步扩大, 上游的什邡、绵竹、彭州市, 下游的威远县、东兴、贡井、大安区碳排放低于  $2.00 \times 10^6$  t, 泸县、新都、龙泉驿区和金堂县的碳排放量均超过  $3.00 \times 10^6$  t。从空间分布来看, 上游成都平原经济区的碳排放量高于下游川南经济区。

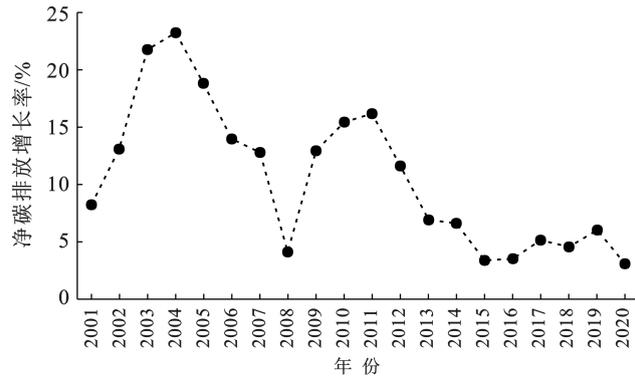


图 2 沱江流域 2001—2020 年净碳排放量增长率

Fig.2 Growth rate of net carbon emissions in Tuojiang River basin from 2001 to 2020

3.1.2 土地利用碳平衡协调度 由表 3 可知, 随着能源利用效率的不断提高及退耕还林政策的有序推进, 沱江流域各区县的土地利用碳平衡协调度均在提升, 但 70% 以上的区域处于失调衰退状态。其中, 青白江、新都、贡井、大安、沿滩、龙马潭、旌阳区、广汉市、市中区及隆昌县处于严重失调状态; 乐至、安岳、仁寿县则处于过渡发展状态; 彭州市、荣县、什邡市、绵竹市及威远县处于协调状态。

表 3 2000—2020 年沱江流域各区县土地利用碳平衡协调度  
Table 3 Coordination of land use carbon balance in various districts and counties of Tuojiang River basin from 2000 to 2020

地区	碳平衡协调度				
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
龙泉驿区	0.19	0.22	0.24	0.23	0.28
青白江区	0.11	0.13	0.14	0.17	0.20
金堂县	0.17	0.20	0.19	0.23	0.25
新都区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
彭州市	0.78	1.00	1.00	0.78	0.97
自流井区	0.08	0.12	0.15	0.18	0.20
贡井区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
大安区	0.05	0.07	0.08	0.11	0.12
沿滩区	0.06	0.09	0.08	0.09	0.12
荣县	0.53	0.62	0.59	0.64	0.71
富顺县	0.22	0.27	0.25	0.29	0.31
龙马潭区	0.10	0.11	0.13	0.11	0.10
泸县	0.24	0.28	0.27	0.26	0.27
旌阳区	0.08	0.12	0.12	0.19	0.21
广汉市	0.05	0.07	0.07	0.09	0.11
什邡市	0.56	0.67	0.75	0.75	0.80
绵竹市	1.00	0.83	0.83	0.97	0.85
市中区	0.04	0.06	0.09	0.11	0.13
东兴区	0.13	0.19	0.20	0.22	0.23
威远县	0.61	0.66	0.58	0.66	0.75
资中县	0.22	0.29	0.26	0.32	0.35
隆昌市	0.12	0.13	0.15	0.18	0.18
仁寿县	0.34	0.39	0.42	0.44	0.52
雁江区	0.11	0.14	0.16	0.20	0.24
安岳县	0.39	0.62	0.57	0.50	0.59
乐至县	0.27	0.31	0.31	0.44	0.54
简阳市	0.20	0.24	0.26	0.29	0.34

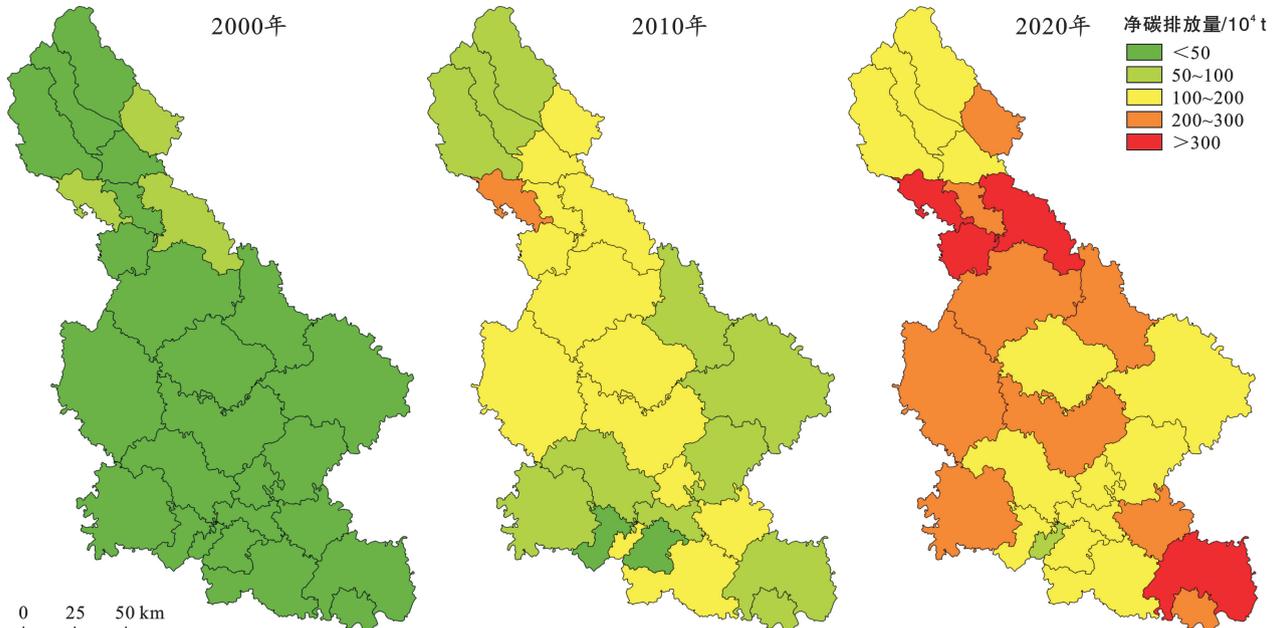


图 3 2000, 2010, 2020 年沱江流域土地利用净碳排放量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of net carbon emissions from land use in Tuojiang River basin in 2000, 2010 and 2020

2000—2020 年沱江流域碳排放经济贡献系数的极差在 0.47~2.25 区间、碳生态承载系数的极差在 5.85~12.82 区间,各区县之间碳生产力的差异小于碳汇能力。依据相关文献<sup>[9,12]</sup>,将沱江流域的碳平衡状态分为 I 类( $ECC > 1, ESC > 1$ )、II 类( $ECC < 1, ESC > 1$ )、III 类( $ECC > 1, ESC < 1$ )、IV 类( $ECC < 1, ESC < 1$ )。

沱江流域上游的碳平衡状态优于下游。其中,仁寿、威远、荣县、安岳县及绵竹、什邡、彭州市的状态较为稳定,为 I 类区。成都平原经济区主要从 IV 类转为 III 类,碳生产力在提升。川南经济区的富顺、泸县由 III 类转为 IV 类,碳生产力在减弱;市中区、自流井、龙马潭区则是由 IV 类转为 III 类,碳生产力在提升(图 4)。

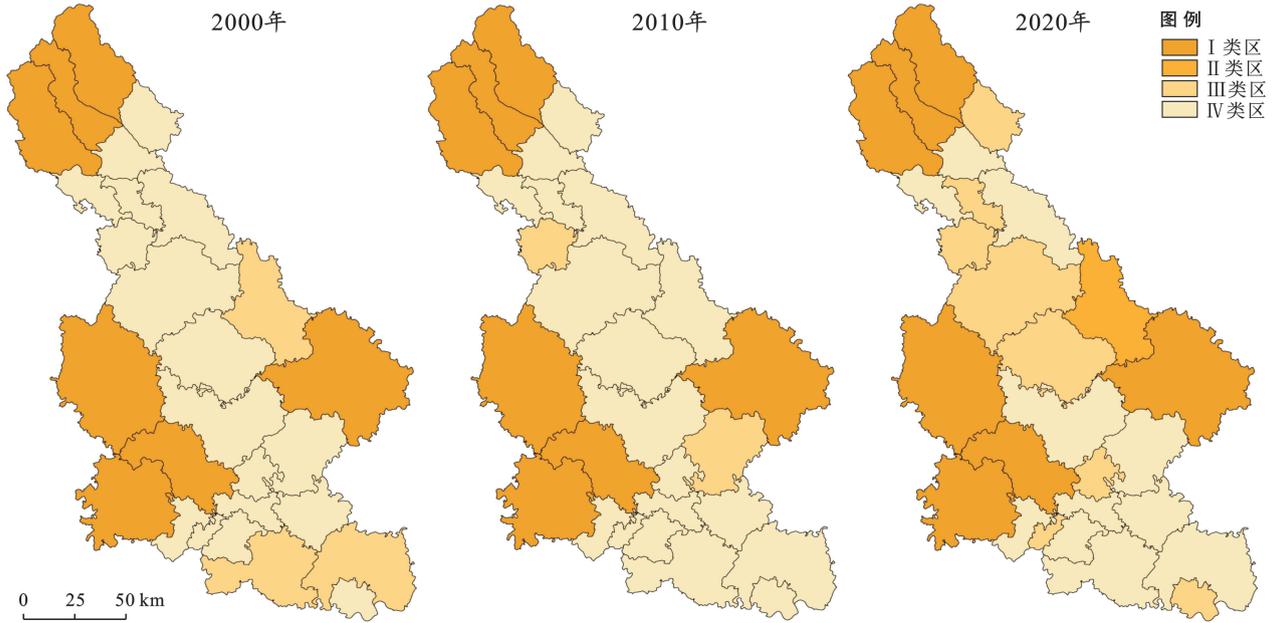


图 4 2000,2010,2020 年沱江流域土地利用碳平衡分区空间分布

Fig.4 Spatial distribution of land use carbon balance zoning in Tuojiang River basin in 2000, 2010 and 2020

### 3.2 人类活动强度时空演变特征

基于前人研究<sup>[5]</sup>将 2000,2010,2020 年的人类活动强度分为低( $< 15\%$ )、较低( $15\% \sim 20\%$ )、中( $20\% \sim$

$25\%$ )、较高( $25\% \sim 30\%$ )、高( $> 30\%$ )5 个等级。2000—2020 年沱江流域人类活动强度由 18.91% 逐渐增至 20.53%,增幅为 1.62%,整体处于中等强度水平(图 5)。

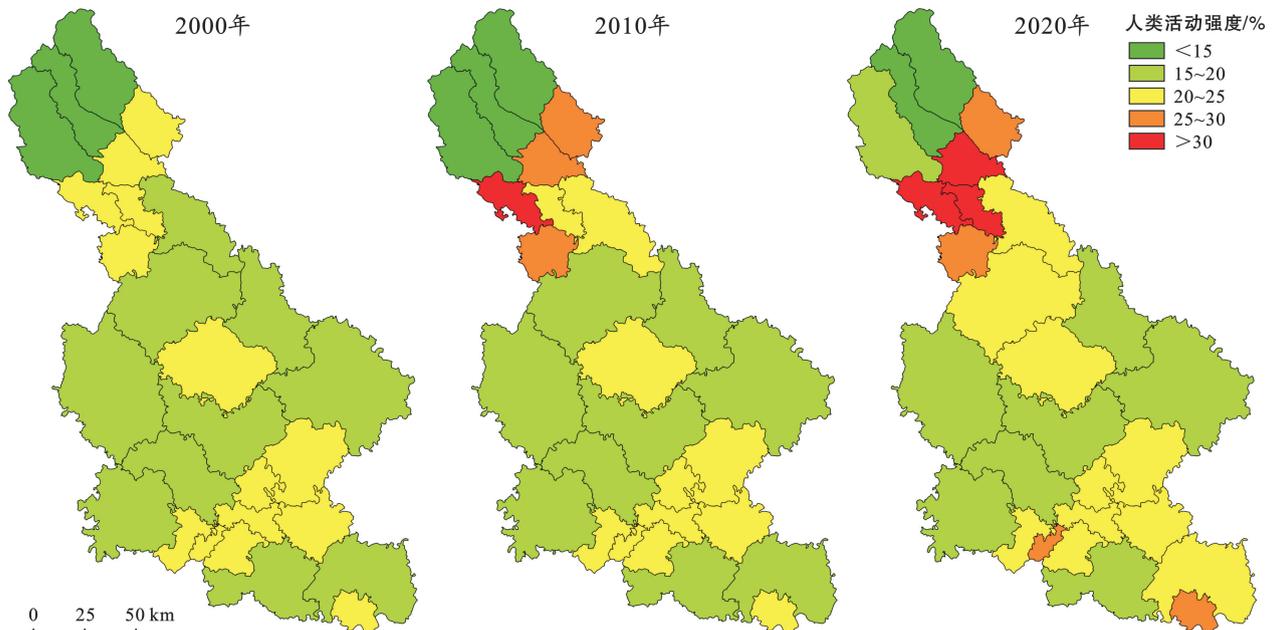


图 5 2000,2010,2020 年沱江流域人类活动强度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of human activity intensity in Tuojiang River basin in 2000, 2010 and 2020

2000 年,沱江流域各区县人类活动强度均在 25% 以下;2010 年仅旌阳区、广汉市、新都区、龙泉驿区的人类活动强度超过了 25%;而 2020 年人类活动强度大于 25% 的区域进一步扩张,主要集中在成都平原。人类活动强度变化最大的是新都区,增加了 14.7%;其次为龙泉驿、青白江、龙马潭、旌阳区及广汉,变化量均超过了 5%。沱江流域的人类活动强度从北向南呈现“低—高一低—高”的格局,其中位于上游的成都平原经济区城市群和下游的川南经济区城市群的人类活动强度较大。

### 3.3 人类活动强度与碳平衡的协同关系

将 2000—2020 年沱江流域的人类活动强度与人均 GDP、人均碳排放量进行回归分析。由图 6 可知,

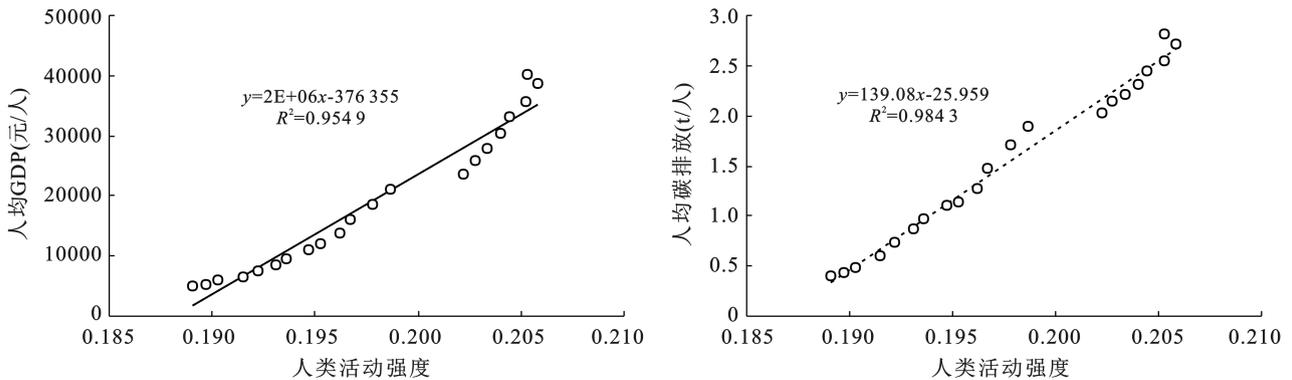


图 6 沱江流域人类活动强度与人均 GDP 值、人均碳排放的关系

Fig.6 The relationship between human activity intensity and per capita GDP and per capita carbon emissions in Tuojiang River basin

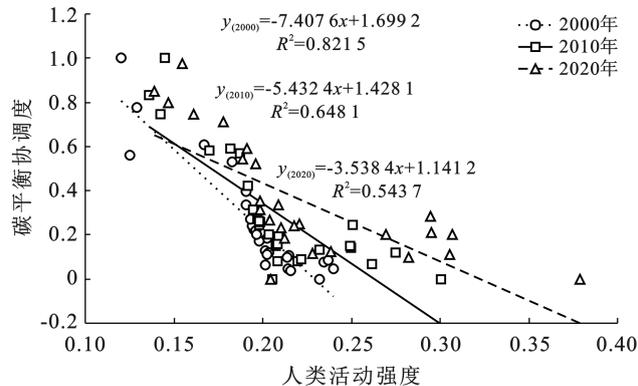


图 7 沱江流域人类活动强度和土地利用碳平衡协调度的关系

Fig.7 Relationship between human activity intensity and land use carbon balance coordination in Tuojiang River basin

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

土地利用碳平衡受碳生产力与碳汇能力的影响。沱江流域的植被覆盖度低,林地面积比例在 10% 以下,草地、水域及未利用地面积比例在 2% 以下,因

沱江流域的人类活动强度与人均 GDP、人均碳排放的均存在极显著的线性关系 ( $p < 0.01$ ),  $R^2$  分别为 0.954 9, 0.984 3, 各线性回归方程拟合度较高。人类活动强度可以解释人均 GDP、人均碳排放 96% 以上的变化原因,均表现为显著的正相关关系。

将 2000, 2010, 2020 年沱江流域各区县的人类活动强度和土地利用碳平衡协调度进行皮尔逊相关系数和线性回归分析。2000, 2010, 2020 年的皮尔逊相关系数为: -0.906, -0.806, -0.737, 均呈现出 0.01 水平的显著性。沱江流域各区县的人类活动强度与土地利用碳平衡协调度呈显著负相关关系 ( $p < 0.01$ ), 2000, 2010, 2020 年线性回归方程的  $R^2$  分别为: 0.821 5, 0.648 1, 0.543 7, 线性回归方程的拟合度均较好(图 7)。

此,流域整体碳汇水平较低,其碳排放量显著大于碳吸收量,导致流域的净碳排放量及人均碳排放量逐年增大。而单位 GDP 能耗及净碳排放增长率的降低趋势则说明流域的资源利用效率在不断提高,碳生产力水平在不断提升。尽管各区县净碳排放量都在向高排放状态演变但仁寿、威远、荣县、安岳县及绵竹、什邡、彭州市等林地面积较大,碳汇能力较强的区县的碳平衡状态在 20 a 间并未发生显著变化。由此可以推断,提升碳汇能力是稳定碳平衡状态的重要途径。

沱江流域各区县的人类活动强度及土地利用碳平衡协调度均在增大,技术进步与能源利用效率的提高可使土地利用碳平衡协调度与人类活动强度的负相关程度逐渐减弱。成都平原经济区的人类活动强度高于川南经济区,上游受人类干扰的程度较下游高,但上游的碳平衡状态却优于下游。由此可推,不同区域土地利用碳平衡失调的人类活动强度值不一。区域的自然及社会经济条件的差异会影响区域碳平衡的抗干扰能力,而碳生产力水平高的区域,抗干扰能力强。因此,经济发展快、城市化水平高、碳减排压

力大的区域可以通过提升碳生产力水平来提高区域碳平衡的抗干扰能力,从而提升区域土地利用碳平衡的协调水平。

本文对沱江流域的区域碳减排规划提出以下建议:绵竹、什邡、彭州市荣县、威远、安岳、乐至县等碳平衡发展协调的区域可在稳定碳汇能力的同时谋求最大程度的经济发展;通过调整产业结构,因地制宜地发展现代农业、低碳产业;在乡村振兴的方针政策下推进建设高标准农田、绿色农田、生态农业等特色产业。而其他碳平衡失调的区域应以降低碳排放增速为目标;通过提高土地集约利用率以控制建设用地扩张;通过严格保护并规划增加生态用地,同时提高城市绿化率以提高区域碳汇能力;通过升级产业结构、提高清洁能源利用率并促进产业技术革新以控制碳排放增长。

## 4.2 结论

(1) 2000—2020 年沱江流域表现为净碳源。净碳排放量增加了  $5.10 \times 10^7$  t;碳排放量增加了  $5.13 \times 10^7$  t,主要来自建设用地;碳吸收量则变化不大,主要来自林地。沱江流域的人均碳排放在不断增加,由 0.4(t/人)增至 2.81(t/人),但单位 GDP 碳排放量及净碳排放增长率呈下降趋势,沱江流域的能源利用率在不断提高,相关的节能减排措施取得一定成效。

(2) 沱江流域各区县的土地利用碳平衡协调度均在提升,但 70% 以上的区域处于失调衰退状态,上游地区的碳平衡状态优于下游。仁寿、威远、荣县、安岳县及绵竹、什邡市的等区县的碳生产力与碳汇能力处于相对发展协调状态,其余区县处于衰退状态。碳平衡失调的区域主要分布城市化水平高、碳生产力较高的区域;碳平衡发展协调的区域主要分布在林地面积较大,碳汇能力较强的区县。

(3) 沱江流域人类活动强度整体处于中等强度水平,空间分布从北向南呈现“低高低高”的格局。沱江流域的人类活动强度与人均 GDP、人均碳排放的均存在显著的正相关关系;各区县的人类活动强度与土地利用碳平衡协调度呈显著负相关关系,但相关程度将随能源利用效率的提高及技术的进步而减弱。不同区域土地利用碳平衡失调的人类活动强度值不同。在人口不断增加,城市化水平不断提高,人类活动强度不断增大的发展趋势下,提升碳生产力水平是改善区域土地利用碳平衡状态的有效途径,提高碳汇能力是稳定土地利用碳平衡状态的重要途径。

## [参 考 文 献]

[1] 徐勇,孙晓一,汤青.陆地表层人类活动强度:概念、方法

及应用[J].地理学报,2015,70(7):1068-1079.

- [2] 陶波,葛全胜,李克让,等.陆地生态系统碳循环研究进展[J].地理研究,2001,20(5):564-575.
- [3] IPCC. Climate change and land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems [M/OL]. 2019 [2019-09-16]. <https://www.ipcc.ch/srcl/>.
- [4] 韩骥,周翔,象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J].生态学报,2016,36(4):1152-1161.
- [5] Ghosh S, Dinda S, Das Chatterjee N, et al. Spatial-explicit carbon emission-sequestration balance estimation and evaluation of emission susceptible zones in an Eastern Himalayan city using pressure-sensitivity-resilience framework: An approach towards achieving low carbon cities [J]. Journal of Cleaner Production,2022,336:130417.
- [6] 赵荣钦,黄贤金,揣小伟.中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向[J].中国土地科学,2016,30(12):83-92.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 徐影,郭楠,茹凯丽,等.碳中和视角下福建省国土空间分区特征与优化策略[J].应用生态学报,2022,33(2):500-508.
- [11] 魏燕茹,陈松林.福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J].生态学报,2021,41(14):5814-5824.
- [12] 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.
- [13] Wang Chao, Zhan Jinyan, Zhang Fan, et al. Analysis of urban carbon balance based on land use dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,281:125138.
- [14] 宋苑震,覃盟琳,袁倩文,等.碳平衡导向下北部湾城市群碳汇用地布局优化研究[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(5):1071-1082.
- [15] Kumar A, Singh D, Mahapatra S K. Energy and carbon budgeting of the pearl millet-wheat cropping system for environmentally sustainable agricultural land use planning in the rainfed semi-arid agro-ecosystem of Aravalli foothills [J]. Energy, 2022,246:123389.
- [16] Zhang Runsen, Matsushima K, Kobayashi K. Can land use planning help mitigate transport-related carbon emissions? A case of Changzhou [J]. Land Use Policy, 2018,74:32-40.

(下转第 365 页)

- 239-243.
- [21] 张彤勋,皮小敏,孙本华,等.秸秆与地膜覆盖对旱作矮土碳氮组分的影响[J].西北农业学报,2018,27(8):1225-1233.
- [22] 邓华,高明,龙翼,等.生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J].环境科学,2021,42(11):5481-5490.
- [23] 徐国伟,段骅,王志琴,等.麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(3):934-942.
- [24] 石丽红,李超,唐海明,等.长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J].应用生态学报,2021,32(3):921-930.
- [25] Fonte S, Yeboah E, Ofori P, et al. Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009,73(3):961-966.
- [26] 黄冬琳,同斯捷,岳良,等.原位酶谱技术分析旱地长期覆盖下根际酶活性空间分布[J].农业工程学报,2022,38(5):123-130.
- [27] 杨凯,胡庆兰,王金贵.青海东部地膜覆盖对土壤固碳能力和肥力水平的影响[J].中国农学通报,2021,37(33):105-111.
- [28] 马寰菲,胡汗,李益,等.秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系[J].环境科学,2021,42(9):4510-4519.
- [29] Mulvaney R L, Khan S A, Ellsworth T R. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009,38(6):2295-2314.
- [30] 李雨诺,樊媛媛,曹彬彬,等.关中平原麦玉轮作体系作物秸秆不同还田模式下土壤有机碳和无机碳库变化特征[J].应用生态学报,2021,32(8):2703-2712.
- [31] Huijin Shi, Wang Xiujun, Wang Yuanjie, et al. Relationship between soil inorganic carbon and organic carbon in the wheat-maize cropland of the North China Plain [J]. *Plant and Soil*, 2017,418(1):423-436.
- [32] 孙昭安,王方,张珊,等.秸秆添加对石灰性土壤有机与无机碳释放的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1520-1529.
- [33] 曾骏,董博,张东伟,等.不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳、无机碳和微生物量碳的影响[J].水土保持通报,2013,33(2):35-38.

(上接第356页)

- [17] 赵荣钦,张帅,黄贤金,等.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J].地理学报,2014,69(10):1425-1437.
- [18] Xia Chang, Yeh A G O, Zhang Anqi. Analyzing spatial relationships between urban land use intensity and urban vitality at street block level: A case study of five Chinese megacities [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020,193:103669.
- [19] Newbold T, Scharlemann J P W, Butchart S H M, et al. Ecological traits affect the response of tropical forest bird species to land-use intensity [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2013,280(1750):20122131.
- [20] Jiang Li, Deng Xiangzheng, Seto K C. The impact of urban expansion on agricultural land use intensity in China [J]. *Land Use Policy*, 2013,35:33-39.
- [21] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
- [22] 四川省水利电力厅.沱江志[M].四川 成都:四川省水利电力厅,1991.
- [23] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual landcover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [24] 景勇,左玲丽,彭文甫.四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析:以绵阳市为例[J].环境科学与技术,2021,44(6):172-185.
- [25] 彭文甫,樊淑云,潘荟交,等.区域土地利用变化的碳排放效应及时空格局研究[J].生态经济,2013,29(9):28-33.
- [26] 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),2007,37(6):804-812.
- [27] 肖红艳,袁兴中,李波,等.土地利用变化碳排放效应研究:以重庆市为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2012,29(1):38-42.
- [28] Chuai Xiaowei, Gao Runyi, Huang Xianjin, et al. The embodied flow of built-up land in China's interregional trade and its implications for regional carbon balance [J]. *Ecological Economics*, 2021,184:106993.
- [29] 卢鹤立.土地利用碳排放核定方法与案例分析[M].北京:科学出版社,2016.
- [30] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- [31] 廖重斌.环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J].热带地理,1999,19(2):171-177.