

# 1980—2020年洞庭湖流域土地利用变化及其碳效应

杨扬, 周浩, 文高辉, 夏卫生, 罗梦怡

(湖南师范大学地理科学学院, 湖南长沙410081)

**摘要:** [目的] 探查粮食主产区土地利用变化规律及其碳效应, 为土地利用结构调整及低碳经济发展提供依据。[方法] 基于1980, 2000, 2020年3期土地利用现状数据, 在网格采样法、土地利用动态度模型、碳排放系数法以及空间自相关分析模型支持下, 揭示1980年以来洞庭湖流域土地利用变化规律及其碳效应的空间异质性特征。[结果] ①洞庭湖流域土地利用阶段性变化。1980—2000年综合动态度为0.02%, 其中动态度最大的是建设用地, 未利用地次之。2000—2020年综合动态度增至0.18%, 建设用地面积增长加快。②净碳效应表现为碳汇, 但由1980年的 $5.93 \times 10^7$  t下降到2020年 $2.82 \times 10^7$  t, 而由土地利用变化引起的碳效应呈现碳排放变化量大于碳汇变化量特点, 并导致净碳排放量增加了 $6.08 \times 10^5$  t, 且空间上净碳排放相对高值区呈“H”型分布特点, 低值区逐渐扩张。③洞庭湖流域集水小区净碳排放的空间自相关性特征显著。1980—2000年主要聚集类型为高一高型和低—低型, 低—高型分布零散, 2000—2020年高一高型分布更加集中连片, 低—低型主要在湘江流域北部。[结论] 在洞庭湖流域, 应坚持“碳增汇, 碳减排”定位, 保持林地的碳汇稳定状态, 科学引导高碳排放土地的开发利用, 并依据空间自相关特点关注不同集水区的碳排放“同化”作用。

**关键词:** 碳排放; 土地利用变化; 空间格局; 洞庭湖流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0390-08

中图分类号: F301.24

**文献参数:** 杨扬, 周浩, 文高辉, 等. 1980—2020年洞庭湖流域土地利用变化及其碳效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 390-397. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.044; Yang Yang, Zhou Hao, Wen Gaohui, et al. Land use change and its carbon effect in Dongting Lake basin during 1980—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 390-397.

## Land Use Change and Its Carbon Effect in Dongting Lake Basin During 1980—2020

Yang Yang, Zhou Hao, Wen Gaohui, Xia Weisheng, Luo Mengyi

(College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China)

**Abstract:** [Objective] The land use change pattern and its carbon effect in the main grain producing areas were investigated in order to provide a basis for restructuring land use and for low carbon economic development. [Methods] We used multi-period land use status data supported by the grid sampling method, a land use dynamic attitude model, a carbon emission coefficient method, and a spatial autocorrelation analysis model to determine the spatial heterogeneity characteristics of land use change patterns and their carbon effect in the Dongting Lake basin since 1980. [Results] ① Land use in the Dongting Lake basin changed in stages, with a comprehensive dynamic attitude of 0.02% from 1980 to 2000. During this time, the largest dynamic attitude was construction land, followed by unused land. The comprehensive dynamic attitude increased to 0.18% from 2000 to 2020, with accelerated growth in the area of construction land. ② The net carbon effect was manifested as a carbon sink, from  $5.93 \times 10^7$  t in 1980 to  $2.82 \times 10^7$  t in 2020, while the carbon effect caused by land use change showed that the change in carbon emissions was greater than the change in carbon sinks, leading to an increase in net carbon emissions of  $6.08 \times 10^5$  t. High value net carbon emissions were distributed in an “H” shape, and the low value emissions area expanded gradually. ③ The spatial autocorrelation of net

收稿日期: 2022-12-29

修回日期: 2023-02-24

资助项目: 湖南省自然科学基金项目“气候变化下洞庭湖流域耕地利用格局对水土资源平衡的影响机理及其调控研究”(2021JJ40352); 河南省重点研发与推广专项(222102320299); 湖南师范大学2022年大学生创新创业计划校级项目(2022059)

第一作者: 杨扬(2000—), 女(汉族), 天津市滨海新区人, 硕士研究生, 研究方向为国土资源利用与管理。Email: yyang2610@163.com。

通信作者: 周浩(1990—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 讲师, 主要从事耕地资源优化利用研究。Email: zhouhao7404@163.com。

carbon emissions in the Dongting Lake catchment area was significant. The main aggregation types were high-high and low-low from 1980 to 2000. The low-high type was scattered, and the high-high type was more concentrated and contiguous from 2000 to 2020, while the low-low type was mainly found in the northern part of the Xiangjiang River basin. [Conclusion] In Dongting Lake basin, people should maintain the orientation of “increasing carbon sinks and reducing carbon emissions”, maintain the stable state of carbon sinks in forest land, scientifically guide the development and use of land with high carbon emissions, and give attention to the “assimilation” of carbon emissions in different catchment areas according to the characteristics of spatial autocorrelation.

**Keywords:** carbon emissions; land use change; spatial patterns; Dongting Lake basin

碳排放是全球气候变化的主要动因之一,而土地利用变化又是碳排放的重要驱动因素,由土地利用变化导致的碳排放已占全球碳排放的 1/3<sup>[1-2]</sup>。为控制以二氧化碳为主的温室气体大量排放行为,中国制定了“双碳”重大国家战略,即 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”目标。因此,明晰典型区土地利用变化与碳效应的内在定量关系,对于土地利用结构调整及低碳经济发展具有重要现实意义。

当前,相关学者围绕土地利用碳效应问题开展了大量研究。研究内容方面,主要集中在碳排放的影响因素<sup>[3-5]</sup>、空间格局<sup>[6-7]</sup>、动态模拟与情景预测<sup>[8-9]</sup>和低碳土地利用等<sup>[10]</sup>方面。相应碳排放测算方法主要包括物料平衡法、排放系数法、实测法和因素分解法等<sup>[11]</sup>。其中碳排放系数法<sup>[12-13]</sup>具有易获取数据、应用简单、可操作性强等优点,便于从宏观上对土地利用碳排放来开展研究,并已成为国内碳效应测算的主要方法之一。尽管已有研究较为系统和成熟,但仍存在进一步研究必要:①当前碳效应测算多以行政单元进行,时空演变规律集中在“渐变型”,缺乏对土地利用“转变型”的碳效应研究<sup>[14]</sup>,且结果难以进一步度量行政单元内部差异,在精细化的碳效应测算方面尚有待强化;②相关研究对跨省市的流域尺度研究较少,而由于流域内部自然资源要素相对系统和完整,相比于行政管理单元,从流域角度进行土地利用碳效应管理将更加符合土地利用内在自身演化规律。虽然已有以流域为对象的研究成果,但其本质仍是“轮廓”。依据流域集水特性,划分研究单元,遵循其动态发展内在规律性,而非单纯地人为分割单元,以此开展土地利用碳效应的异质性研究,具有较强的理论指导意义。

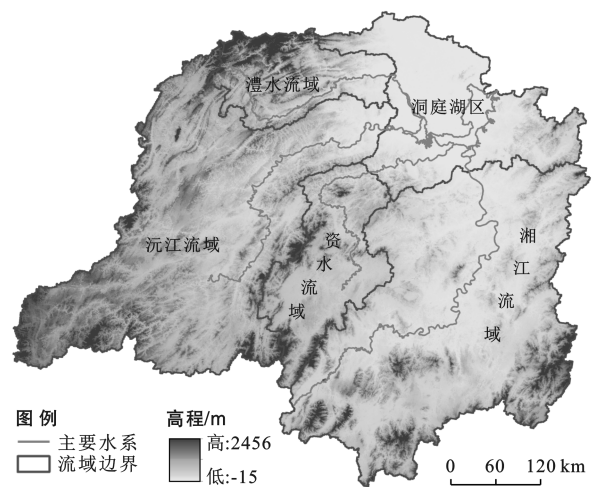
洞庭湖流域作为中国南方重要农副产品生产基地,该地区强烈的农业生产活动及经济活动使得土地利用变化显著,进一步导致碳源增加、碳汇减少<sup>[15]</sup>。在倡导发展低碳经济背景下,本文将基于多期土地利用现状以及 DEM 等数据,采用碳排放系数法、网格采样和空间自相关分析等方法,揭示 1980 年以来该

流域土地利用变化及其碳效应的空间异质性规律,为当地低碳土地利用行为调整及资源空间配置提供支持。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

洞庭湖流域面积  $2.63 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,辖湖南省大部分区域以及湖北、贵州、广西、重庆等省市小部分地区,并由洞庭湖区、湘江流域、资水流域、沅水流域和澧水流域 5 个子流域组成(图 1)。流域三面环山,整体地势由南部逐渐向东北部倾斜,呈现出开口向北的“马蹄形”结构,东为幕阜—罗霄山脉,南为南岭山脉,西为武陵—雪峰山脉,东北部主要为平原。流域属典型的亚热带季风湿润气候,雨热同期,降水量充沛,水系发达,其境内的洞庭湖是保障长江中下游地区生态环境安全的天然屏障。



注:本图源于国家基础地理信息中心,并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)3333 号标准地图校准制作,下同。

图 1 洞庭湖流域基础地理要素示意图  
Fig.1 Basic geographical elements map of Dongting Lake basin

### 1.2 数据来源

综合考虑数据的易获取性,并结合区域的经济发展阶段性,确定 1980,2000,2020 年为本文研究时点。

其中,土地利用原始信息源均来自美国陆地资源卫星 Landsat 多光谱遥感影像,数据获取自美国地质勘探局 USGS,过程中涉及选用不同的卫星数字产品,在影像的几何纠正、图像增强等预处理基础上,进行人机交互式目视解译,并结合后期的室内数据纠正,完成 1980,2000,2020 年共 3 期土地利用信息识别;精度验证及室内纠正方面,1980 年主要通过比对中国科学院资源环境科学数据中心“中国土地利用现状遥感监测数据”(30 m)以及历史文本资料进行,2000 年则通过 Google Earth 软件来布控数据的采样网格验证点来实现(解译准确率均大于 85%),而对于现状年(2020 年)的验证则通过典型区 GPS 信息样点的比对验证和记录来完成解译精度验证(解译准确率 89.20%);基础地理信息数据包括 SRTM 的 DEM 数字高程模型数据(30 m)和行政区划数据,数据均获取自国家基础地理信息中心;2020 年主要农作物产量、化肥、农药、农膜等耕地生产投入数据以及工业能源消耗等统计数据来源于《湖南统计年鉴(2021)》。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用变化分析

动态度指数客观描述了土地利用变化状态的总体特征,其中单一动态度  $K$  为某地类在研究期的面积变化速率,综合动态度  $L_c$  则为所有地类在研究期的整体面积变化快慢情况,二者公式依次为:

$$K = \frac{1}{T}(U_b - U_a) / U_a \times 100\% \quad (1)$$

$$L_c = \frac{1}{T} \left( \sum_{i=1}^n \Delta L_{U_i-j} / 2 \sum_{i=1}^n L_{U_i} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $U_a$  为对应地类在研究期初期的面积( $\text{km}^2$ ); $U_b$  为该地类在研究期末期的面积( $\text{km}^2$ ); $T$  为研究时段长度(a); $L_{U_i}$  为研究期初期  $i$  种地类的面积( $\text{km}^2$ ); $L_{U_i-j}$  为  $i$  种地类变为  $j$  种地类的面积( $\text{km}^2$ )。此外,对于土地的年份间转移变化状况分析,主要采用土地利用转移矩阵来实现,该方法是马尔科夫模型在土地利用变化方面的应用,它不仅可以定量地表明不同土地利用类型之间的转化情况,还可以揭示不同土地利用类型间的转移速率,从而揭示洞庭湖流域土地利用类型的转移途径与幅度。

### 2.2 碳效应测算方法

2.2.1 碳效应系数法 土地利用变化引起的碳效应是指直接或间接的土地利用行为对陆地生态系统碳循环的影响,通过碳汇增量与碳排放增量差值来表征<sup>[16]</sup>。在各地类转化中,耕地既是碳源又是碳汇,建设用地一般只考虑碳源功能,而林地、草地、水域、未

利用地通常只考虑碳汇功能。本文采用碳排放系数法<sup>[17]</sup>来测算碳效应,公式为:

$$CE = \sum(\alpha_i \times S_i) \quad (3)$$

式中:CE 代表各地类的碳排放/碳汇(t); $\alpha_i$  为第  $i$  种地类所对应的碳效应系数; $S_i$  指第  $i$  种地类的面积( $\text{km}^2$ )。碳效应系数确定方面,由于洞庭湖流域以湖南省为主,考虑到数据收集可行性,研究参考湖南省碳效应系数实现流域碳效应测算,具体为:①利用湖南省化肥、农药等农业生产投入数据及其排放系数<sup>[18]</sup>、主要农作物产量数据和碳吸收率<sup>[19]</sup>得到耕地的碳排放量和碳吸收量,结合耕地面积计算得到耕地碳源/碳汇系数;②借鉴相关学者测算的湖南省林地上种植的主要树种碳汇量<sup>[20]</sup>,结合林地面积得到林地碳汇系数;③建设用地碳排放采用 IPCC 的计算方法,利用湖南省各种化石能源数量、化石能源标准煤转换系数和能源碳排放系数间接估算出建设用地碳排放系数;④草地、水域和未利用地则通过相关文献确定其碳汇系数<sup>[21-23]</sup>。按以上计算方法,通过分析与综合确定了 2020 年洞庭湖流域的土地利用碳效应参数,1980 年和 2000 年沿用 2020 年的碳效应参数值(表 1)。同时,在历年碳排放空间分布图基础上,运用自然断点法,将洞庭湖流域土地利用碳排放分为高、较高、中、较低和低共 5 级。

表 1 洞庭湖区土地利用碳效应系数  
Table 1 Carbon effect coefficient of land use in Dongting Lake basin

土地利用类型	碳汇系数/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	碳源系数/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	参考来源
耕地	2.752	1.536	李强等 <sup>[18]</sup> ,游和远等 <sup>[19]</sup>
林地	4.600		尹少华等 <sup>[20]</sup>
草地	0.021		方精云等 <sup>[21]</sup>
水域	0.253		段晓楠等 <sup>[22]</sup>
建设用地		81.486	IPCC 及统计年鉴
未利用地	0.005		赖力等 <sup>[23]</sup>

2.2.2 碳效应栅格化处理 为实现碳效应的空间栅格化处理,本文借鉴景观生态学中能反映景观格局特征的网格采样法,并考虑平均斑块面积大小(平均斑块面积的 2~5 倍能较好地反映采样区周围景观格局的异质性特征),确定网格采样尺寸  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ (研究区边缘的不规则地块,面积大于 0.5 个规则网格的单独作为一个样区,面积小于 0.5 个规则网格的并入相邻的样区,最终共有样区 10 976 个),来网格采样碳效应。继而将对应网格的碳汇、碳排放、净碳排放值视作该网格中心点值,并运用克里金插值法(Kriging),实现洞庭湖流域碳效应的栅格化处理(分辨率为 30 m)。



### 2.3 碳效应空间异质性分析

流域作为独立的水文集水单元,其内部水文循环完整且系统,一个完整的流域由大小不等、各式各样的集水小区组成。为探寻不同集水区条件下土地利用变化特征,研究基于DEM数据,经洼地填充计算等前期处理,利用水流径流模块对洞庭湖流域进行集水小区分割,共划分为142个集水小区。将集水小区与洞庭湖流域二级流域(洞庭湖区、湘江流域、资水流域、沅水流域和澧水流域)相关联。在此基础上,采用空间自相关分析中的全局自相关和局部自相关分析方法,方法原理见周浩等<sup>[24]</sup>研究结果,来衡量观测流域小区的属性值与周边属性值的相近(正相关)或差异(负相关)程度,以揭示碳效应的空间异质性特征。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化分析

研究期内,洞庭湖流域境内的耕地、林地面积持续减少,同时受域内经济建设影响,建设用地面积快速增加,整体呈显著的阶段性变化特征。1980—2000年,流域内土地利用开发活动较为平缓,各地类转化强度较小,对应的综合土地利用动态度低于0.1%,其中未利用地受农业垦殖开发影响快速萎缩,对应动态度达到-0.34%,建设用地增加幅度最大,水域用地次之,二者动态度分别为0.83%和0.37%,草地面积变化平缓;2000—2020年,洞庭湖流域经济

快速发展,使得该地区土地利用变化明显加剧。该时段内综合动态度已增至0.18%,建设用地面积增加了3 334.28 km<sup>2</sup>,动态度由0.83%变为4.92%,扩张速度增长了近5倍;尽管40 a间耕地垦殖率维持在29%左右,但耕地依然呈现持续下降趋势,动态度由上一时段的-0.05%降至-0.21%,草地面积缩减较为明显,其动态度达到-0.62%,而未利用地动态度则变为1.61%。

从转移上来看(表2),1980以来洞庭湖流域主要表现为耕地与林地的相互转化以及耕地向水域、建设用地转出的规律,耕地减少的主要流向为林地、水域用地和建设用地,三者之和占耕地转出面积的98%,其中向水域用地转出面积最大,建设用地次之。林地主要向耕地转移,转化面积为267.23 km<sup>2</sup>,其他用地面积转移较为平缓,面积变动均不超过200 km<sup>2</sup>;2000—2020年,整体面积转移情况更加剧烈,耕地与林地依然表现出较为明显的交互转化特点,但与上一周期相比,其转移面积增加了近20倍,其次是耕地和林地向建设用地转移,二者占建设用地新增量的94%,是建设用地面积增加的主要来源,草地向林地的转移使得草地面积下降2 197.91 km<sup>2</sup>。值得注意的是,水域用地向未利用地的转入是未利用地面积上升的主要来源,有404.19 km<sup>2</sup>的水域用地转为未利用地,占面积增加来源的88%,主要由于地势低洼、排水不畅通造成长期潮湿,使得水域演替为沼泽地,进而增加未利用地面积。

表2 1980—2020年洞庭湖流域土地利用变化转移矩阵

Table 2 Land use change transfer matrix for Dongting Lake basin from 1980 to 2020

km<sup>2</sup>

研究时段	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1980—2000年	耕地	7 7433.54	271.39	18.94	450.14	360.27	4.72
	林地	267.23	158 438.87	196.30	132.43	111.73	4.24
	草地	45.83	147.77	15 214.10	12.77	5.05	0.42
	水域	72.07	15.701	13.46	7267.61	8.14	10.81
	建设用地	1.26	0.83	0.02	0.15	2 903.93	0.01
	未利用地	3.86	6.57	0.62	68.43	0.85	807.21
2000—2020年	耕地	69 730.26	4 683.64	319.55	906.08	2 146.90	36.24
	林地	3 422.22	152 970.05	625.20	367.88	1 476.26	12.46
	草地	485.37	2 197.91	12 542.83	86.68	126.00	2.65
	水域	599.30	189.50	20.98	6 635.27	81.70	404.19
	建设用地	314.03	128.69	10.77	44.85	2 889.74	1.90
	未利用地	19.63	5.23	2.01	160.07	3.59	636.85

### 3.2 土地利用碳效应时空变化分析

3.2.1 碳排放变化分析 近40 a来,洞庭湖流域的碳汇量均大于碳排放量,平均碳汇量和平均碳排放量分别为 $9.47 \times 10^7$  t和 $4.72 \times 10^7$  t,整体碳效应表现

为碳汇状态(图2)。1980年以来,洞庭湖流域碳汇量变化较为平缓,由1980年的 $9.50 \times 10^7$  t降至2020年的 $9.44 \times 10^7$  t,下降率0.64%,流域碳汇量整体维持着较为稳定状态;而对于碳排放而言,碳排放量随时

间变化不断增加,前期增加幅度较小,后期由于建设用地的大幅扩张导致碳排放量激增,由 1980 年的  $3.57 \times 10^7$  t 增至 2020 年的  $6.63 \times 10^7$  t,增长幅度达到 85.32%。碳汇量缓慢减少而碳排放量的急剧增加,导致了净碳排放的持续下降,由 1980 年的  $5.93 \times 10^7$  t 下降到 2020 年的  $2.82 \times 10^7$  t,下降幅度 52.46%。

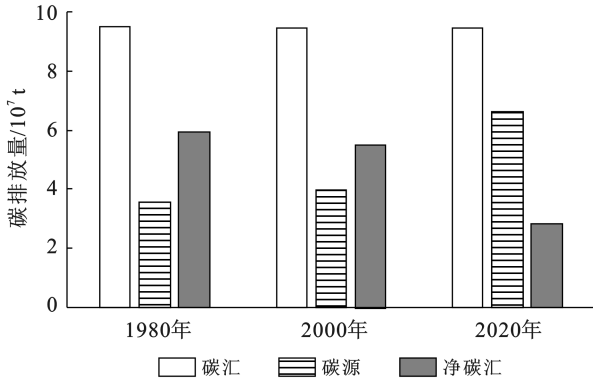


图 2 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用碳效应

Fig.2 Land use carbon effects in Dongting Lake basin from 1980 to 2020

洞庭湖流域碳汇量高值、较高值区整体呈现“H”型空间格局,高值区主要分布于流域境内的澧水流域西北部、湘江流域东部和资水流域与沅江流域的交接处,低值区和较低值区则大部分分布于洞庭湖区。1980—2000 年,各碳汇区在空间上分布规律性特征不显著,而至 2000—2020 年时段,洞庭湖区内碳汇量低值区向西北方向扩张,资水流域以及沅水流域最南部地区的原碳汇量高、较高值区面积呈轻度萎缩特点;碳排放高值、较高值区主要分布在流域东侧的洞庭湖区、资水流域和湘江流域,该地区经济相对较为发达,高碳排放地类较为聚集。碳排放低值区主要分布在澧水流域和沅水流域的四周,与少量的碳排放量中值区交叉分布,且碳排放中值区图斑分布比较分散。1980—2020 年,碳排放高值区和较高值区空间分布呈现出先聚集后分散的特点,碳排放高值区图斑数量明显增多且面积有扩大趋势,洞庭湖区中较大面积的碳排放高值区逐渐向南部的湘江流域迁移,并在湘江流域北部形成高碳排放的核心区;对于净碳排放而言,整体呈现出西高东低的特点,高净碳排放区主要分布在沅江流域和澧水流域,湘江流域东侧亦有少量高净碳排放区,同时从年际分布来看,高值区和较高值区分布较为稀疏,低值区逐渐扩张,净碳排放量整体呈现出下降趋势(图 3)。

3.2.2 土地利用变化的碳排放效应 洞庭湖流域土地利用变化的碳效应主要表现为碳源大于碳汇特点,

整体呈现出碳排放状态,碳效应变化总量为  $6.08 \times 10^5$  t,其中碳汇变化量为  $1.37 \times 10^5$  t,碳源变化量为  $7.45 \times 10^5$  t(表 3)。碳汇增加主要来源于耕地、林地、建设用地与其他用地之间的相互转化,三者贡献量之和占碳汇变化量的 84%,其中耕地与其他用地相互转化带来的碳汇量变动最多,达到  $4.33 \times 10^4$  t;建设用地和其他用地的相互转化是碳源增加主要原因,耕地贡献量次之,二者之和占碳排放增加量的 77%。整体来看,建设用地、耕地和林地与其他用地的相互转化是净碳排放量增加的主要来源,其所贡献的碳排放占总体净碳排放量增加值的 98%,这与耕地和林地的频繁转化以及建设用地的剧烈变动有着一定的关系。

表 3 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用转型碳效应变化

Table 3 Change in carbon effect of land use transition in Dongting Lake during 1980—2020

土地利用类型	碳汇/t	碳源/t	合计
耕地	-43 288.30	213 549.16	170 260.85
林地	-37 487.99	147 698.10	110 210.12
草地	-12 745.02	14 306.96	1 561.94
水域	-5 601.67	10 283.72	4 682.06
建设用地	-37 816.43	358 325.89	320 509.47
未利用地	-318.21	605.06	286.85
总计	-137 257.61	744 768.90	607 511.28

注:负数表示碳汇,正数表示碳源。

### 3.3 土地利用碳排放时空异质性分析

3.3.1 全局空间自相关分析 各集水区土地利用净碳排放呈显著的空间正相关特征,即洞庭湖流域境内土地利用净碳排放的内部规律性特征明显(图 4)。3 个年份的 Moran's *I* 值分别为 0.22, 0.25, 0.32,净碳排放相似的子流域在空间上聚集程度有所提升。Moran's *I* 散点图中第 I 象限和第 III 象限表明土地利用净碳排放存在较强的空间正相关,高(低)值区域单元被相邻高(低)值区域所包围的空间联系形式,即空间单元具有均质性;第 II 象限和第四象限表示土地利用净碳排放存在空间负相关性,某集水区与相邻地区呈现相反的特征,空间单元之间具有异质性;从散点图来看,各年份位于第 I 象限和第 III 象限的散点数目分别为 46, 48, 46, 46, 58, 49 个,比例之和分别为 66%, 64%, 75%,流域内各集水小区呈较为明显的高—高(HH)型和低—低(LL)型集聚特征,散点越靠近原点分布密度越大。随着人类活动强度增加,流域内土地利用净碳排放空间正相关性整体加强,各集水小区之间差异逐渐变小。I, III 象限各散点分布更加

分散, II, IV 象限内散点数目明显减少, 部分低—高 (LH) 型集水小区消失, 分布在第 I 象限子流域数量

逐渐超过第 III 象限的数量, 表明洞庭湖流域土地利用净碳排放高值区在空间上表现出聚集性分布特点。

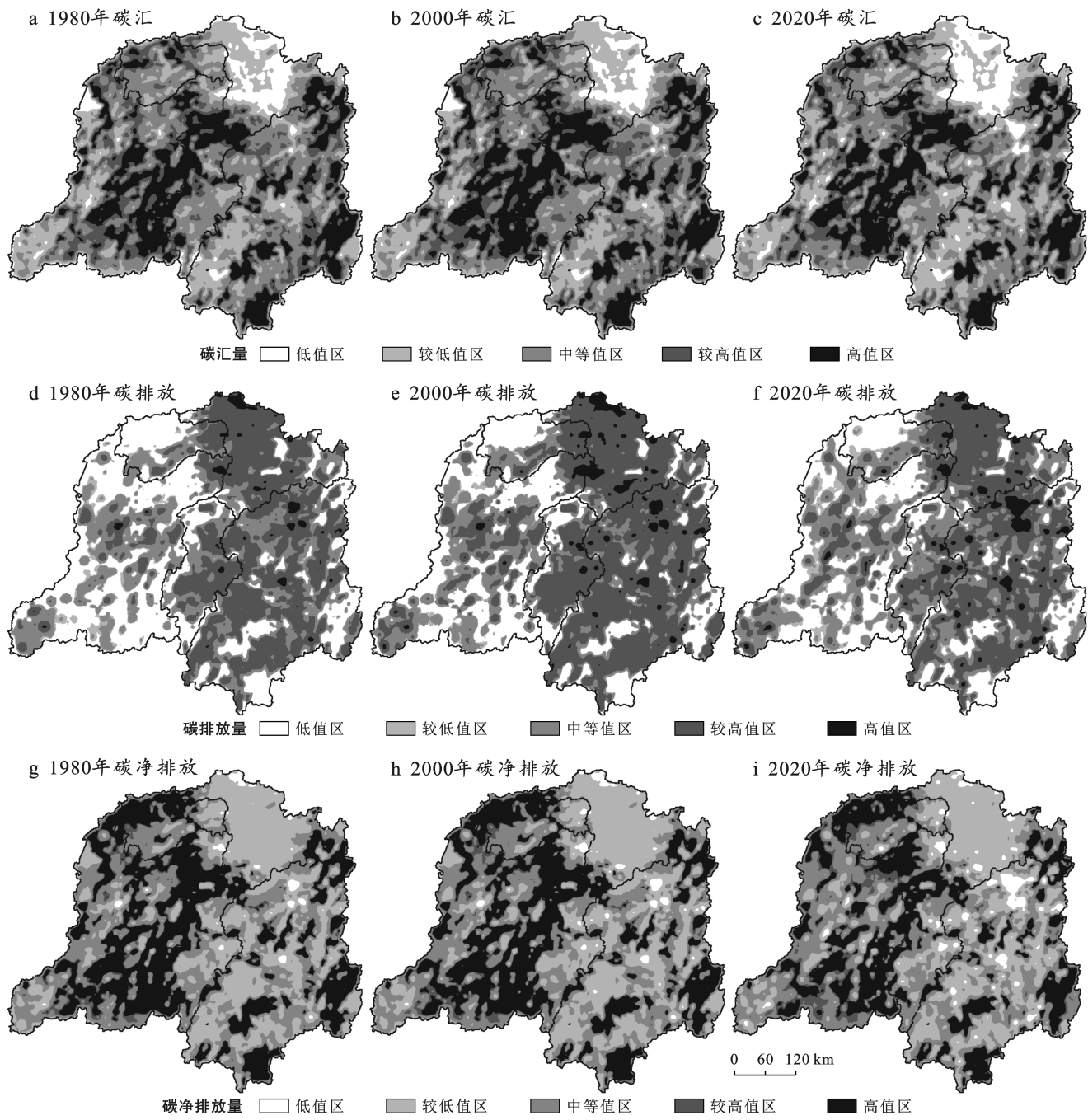


图 3 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用碳效应空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land use carbon effects in Dongting Lake basin from 1980 to 2020

3.3.2 局部空间自相关分析 1980 年,洞庭湖流域土地利用净碳排放量高一高(HH)关联的集水区主要集中在澧水流域南侧、沅江流域西侧和资水流域北侧等(图 5),占流域总面积的 9%。高一高型集水区是流域内碳汇量高值集聚区,这一区域大量分布着主要碳汇地类的林地和耕地,可适度进行以碳排放为主的土地利用活动以促进该地区的经济发展;净碳排放量低—低(LL)关联的子流域主要分布在洞庭湖

区西北部,约占流域总面积 6%,具体包括 9 个集水小区,该地区地势平坦且水资源丰富,具有良好的垦殖条件,大量的耕地和建设用土地利用使得碳汇量少,碳排放量大,并形成碳汇量低值聚集区域,应重点关注该区域建设用地上高碳排放的土地利用活动并加强低碳土地利用方案的制定;该时期不存在高一低(HL)聚集区,而低—高(LH)类型分布比较分散,此类集水小区净碳排放较低,而周围集水小区净碳排放



较高,容易受到同化转为高一高型,因此需要加以开发引导。2000年较1980年相比各类聚集区空间分布变化不大,澧水流域内高一高(HH)型区域向北扩张,表明该地区环境保护措施施行比较完善,会对周围地区产生一定的正向辐射,使得周围地区碳汇量升高;同时低—低(LL)型碳汇量聚集区面积存在小幅度变化;低—高型有3处集水小区呈现为不显著状

态。2020年空间分布变化较显著,高一高(HH)型区域继续向外扩张,原来比较分散的图斑更加集中连片,自北向南分布在沅江流域与资水流域的交界处以及沅江与澧水流域交界处;在湘江流域北部已经出现新的大面积低—低(LL)型聚集区域,并且周围出现了高一低(HL)型区域,该类型易遭受空间极化作用影响转为低—低(LL)型,因此进行适当的开发控制。

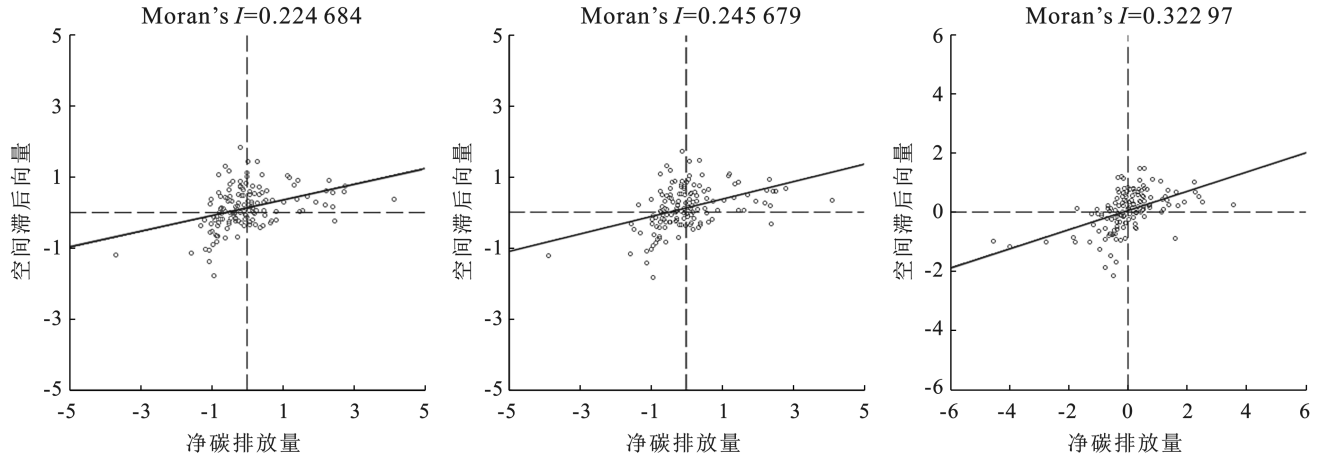


图 4 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用净碳汇 Moran's  $I$  散点图

Fig.4 Moran's  $I$  scatterplot of net land-use carbon sinks in Dongting Lake basin from 1980 to 2020

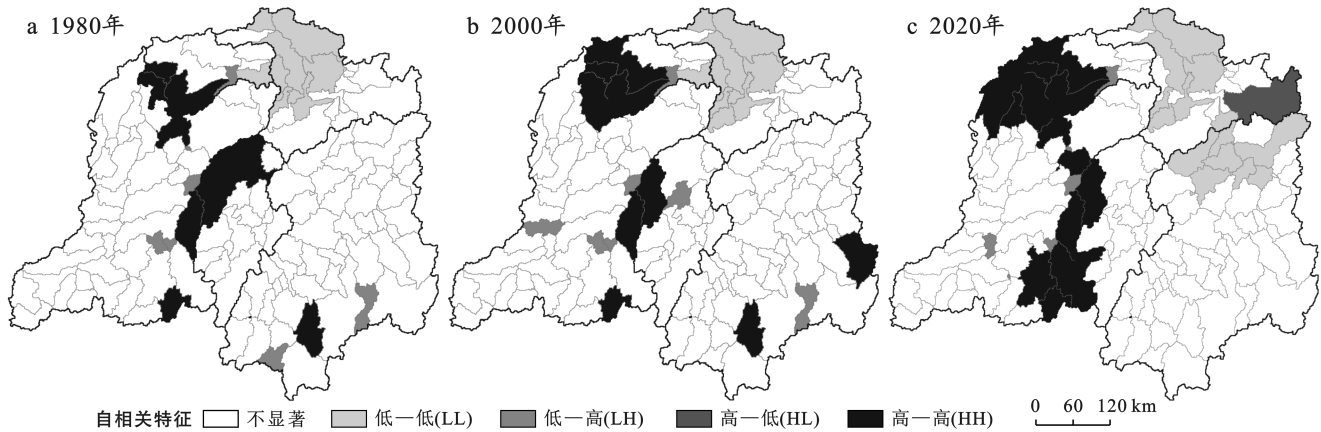


图 5 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用净碳汇局部空间自相关特征

Fig.5 Local spatial autocorrelation characteristics of net land-use carbon sinks in Dongting Lake basin from 1980 to 2020

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

(1) 洞庭湖流域土地利用阶段性变化,1980—2000年综合动态度为0.02%,其中动态度最大的是建设用地,未利用地次之,2000—2020年综合动态度增至0.18%,建设用地面积增长加快。

(2) 净碳效应主要表现为碳汇,由1980年的 $5.93 \times 10^7$  t下降到2020年 $2.82 \times 10^7$  t,而由土地利用变化引起的碳效应呈现碳排放变化量大于碳汇变化量特点,并导致净碳排放量增加了 $6.08 \times 10^5$  t,且空间

上净碳排放相对高值区呈“H”型分布特点,低值区逐渐扩张。

(3) 1980—2020年,Moran's  $I$  值呈现持续增长的趋势,流域土地利用净排放空间正相关性整体加强,子流域之间差异越来越小,分布在第I象限子流域数量逐渐超过第III象限的数量。流域内具有显著性特征的集水区以高一高(HH)型和低—低(LL)型为主,高一高型集中分布在澧水流域南侧、沅江流域西侧和资水流域北侧,低—低型主要分布在洞庭湖区西北部,低—高(LH)类型分布比较分散且集水区数量逐渐减少。

## 4.2 讨论

本文在土地利用碳排放效应的“渐变型”分析基础上,增加了对“转变型”的分析,不仅能够掌握当前研究区土地利用碳排放基本特征,还可以对未来地类转变方向加以优化和指导,相关学者的类似研究<sup>[25-27]</sup>也佐证了该方法科学性。另外,对土地利用净碳汇的空间自相关分析中,本文采用空间邻接关系确定权重,但未充分考虑到经济社会因素对其产生的影响,如何确定该权重值得深入探讨。后续应引入土地利用碳排放影响因素定量化的研究,从能源消耗、经济增长及人口规模等社会经济因素出发,来确定碳排放的主要影响因素,为洞庭湖流域的土地利用优化布局提出建议。

相关政策引导上,由于洞庭湖流域林地面积较大,应注意保持林地的覆盖面积,大力推进退耕还林草湖政策,确保碳汇量维持在稳定状态,避免出现较大波动;建设用地上能源的大量消耗是碳排放的主要来源,对流域的能源消费碳排放进行调控将是未来政策制定重点;考虑到洞庭湖流域位于内陆省份,当前先进的低碳技术创新体系还未建立完成,而由于其能源结构调整压力大、绿色产业结构优化进程缓慢、低碳消费模式还未形成等问题,实现碳达峰、碳中和目标的任务依然艰巨。

### [参 考 文 献]

[1] Beillouin D, Cardinael R, Berre D, et al. A global overview of studies about land management, land-use change, and climate change effects on soil organic carbon [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(4):1690-1702.

[2] Searchinger T D, Wierseni S, Beringer T, et al. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change [J]. *Nature*, 2018, 564(7735):249-253.

[3] 张苗,吴萌.土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析:基于结构方程模型的实证检验[J].*中国土地科学*, 2022, 36(3):96-103.

[4] 曹周亮,张欣蓉,员学锋,等.基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J].*水土保持通报*, 2022, 42(5):376-385.

[5] 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.

[6] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J].*中国土地科学*, 2022, 36(6):100-112.

[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] 杨皓然,吴群.不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J].*地域研究与开发*, 2021, 40(3):121-126.

[9] 顾汉龙,马天骏,钱凤魁,等.基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J].*农业工程学报*, 2022, 38(9):288-296.

[10] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等.面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J].*自然资源学报*, 2021, 36(12):2995-3006.

[11] 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.

[12] 盖兆雪,詹汶羲,王洪彦,等.耕地利用转型碳排放时空分异特征与形成机理研究[J].*农业机械学报*, 2022, 53(7):187-196.

[13] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J].*地理科学*, 2019, 39(12):1955-1961.

[14] 郭晓敏,揣小伟,张梅,等.扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(2):269-280.

[15] 杨伶,邓敏,王金龙,等.近 40 年来洞庭湖流域土地利用及生态风险时空演变分析[J].*生态学报*, 2021, 41(10):3929-3939.

[16] 曾永年,陈晓玲,靳文凭.近 10 a 青海高原东部土地利用/覆被变化及碳效应[J].*农业工程学报*, 2014, 30(16):275-282.

[17] 张余,姜博,赵映慧,等.东北三省土地利用碳排放时空格局及影响因素研究[J].*地域研究与开发*, 2022, 41(4):150-156.

[18] 李强,高威,魏建飞,等.中国耕地利用净碳汇时空演进及综合分区[J].*农业工程学报*, 2022, 38(11):239-249.

[19] 游和远,吴次芳.农地集约利用的碳排放效率分析与低碳优化[J].*农业工程学报*, 2014, 30(2):224-234.

[20] 尹少华,周文朋.湖南省森林碳汇估算与评价[J].*中南林业科技大学学报*, 2013, 33(7):136-139.

[21] 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.

[22] 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, 28(2):463-469.

[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] 周浩,雷国平,杨雪昕.三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究[J].*农业机械学报*, 2017, 48(5):142-151.

[25] 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.

[26] 徐婕,潘洪义,黄佩.基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(1):142-152.

[27] 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.