



生态与农村环境学报
Journal of Ecology and Rural Environment
ISSN 1673-4831, CN 32-1766/X

《生态与农村环境学报》网络首发论文

题目：村庄用地变化碳效应时空分异及影响因素分析：以江苏省为例
作者：林莹，陈龙高，杨小艳，王欣瑶，桑一田，潘怡莎
DOI：10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0836
收稿日期：2024-10-01
网络首发日期：2024-12-13
引用格式：林莹，陈龙高，杨小艳，王欣瑶，桑一田，潘怡莎. 村庄用地变化碳效应时空分异及影响因素分析：以江苏省为例[J/OL]. 生态与农村环境学报. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0836>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0836

村庄用地变化碳效应时空分异及影响因素分析：以江苏省为例

林莹^{1,2}, 陈龙高^{1,2}①, 杨小艳³, 王欣瑶^{1,2}, 桑一田^{1,2}, 潘怡莎^{1,2} (1. 中国矿业大学中国资源型城市转型发展及乡村振兴研究中心, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学公共管理学院, 江苏 徐州 221116; 3. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116)

摘要：推动村庄土地利用效率的提升，是国土空间低碳转型的重要内容。文中以江苏为实证区域，5年一期，研究1990—2020年间村庄用地变化碳效应及其多因素影响规律，为制定精细的差异化碳减排政策措施提供支持。采用碳排放系数、几何重心分析、莫兰指数及多元逐步回归分析方法对江苏省县区存在碳排放、用地变化碳效应时空格局及影响因素进行研究。结果表明：(1) 江苏省各县区的村庄碳排放总体呈碳排放效应，但地均净碳排放强度持续降低且具有显著的空间正相关性；(2) 全省各县区流入碳效应呈碳排放效应，在空间上总体呈南高北低、西高东低的分布格局；(3) 在全局影响因素分析中，人口密度变化、村庄距河流距离、城镇用地比重对村庄用地变化碳效应的影响较大；(4) 年度影响因素分析显示，村庄生产生活活动产生巨大的碳排放量，村庄人口、河流距离、第一产业比重等因素是流入碳效应的主要影响因素，其中人口因素的影响周期相对较长，综合碳效应影响因素与流入碳效应相似。研究结果可为进一步规范地方性碳减排政策的制定及村庄土地利用效率的提升提供指导。

关键词：村庄用地变化；影响因素；碳效应；时空分异；江苏省

文献标志码：A

Spatio-temporal Variations of Carbon Effects in Rural of Land Use Change and Influencing Factors of Jiangsu Province. LIN Ying^{1,2}, CHEN Long-gao^{1,2}①, YANG Xiao-yan³, WANG Xin-yao^{1,2}, SANG Yi-tian^{1,2}, PAN Yi-sha^{1,2} (1. Research Center for Transition Development and Rural Revitalization of Resource-based Cities in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Public Policy & Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Geography, Surveying and Urban Rural Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: This paper studies the carbon effect of rural land use change and its multi-factors in Jiangsu province to support the development of differentiated carbon reduction policies and measures from 1990 to 2020. The spatial and temporal patterns of carbon emission, land use change and its influencing factors were studied by using carbon emission coefficient, geometric barycenter analysis, Moran's index and multiple stepwise regression analysis. The results are as follows: (1) the village carbon emission of every county and district in Jiangsu province shows a carbon emission effect in general, and the net carbon emission intensity of every district in Jiangsu province decreases continuously, with a significant positive spatial correlation; (2) the inflow carbon effect of every county and district in Jiangsu province shows a carbon emission effect; The spatial distribution pattern is high in the south and low in the north, high in the west and low in the east; (3) the population density, the distance between village and river, and the proportion of urban land use have great influence on the carbon effect of village land use; (4) factors such as village population, river distance and primary sector of the economy proportion were the main influencing factors

收稿日期：2024-10-01

基金项目：江苏省社科基金项目(22GLB028); 中国矿业大学校基本科研业务费项目-重大项目培育专项基金(2022ZDPYSK08)

①通信作者 E-mail: chenlonggao@163.com

of the inflow carbon effect in the analysis of annual influencing factors. The comprehensive influencing factors of the inflow carbon effect were similar to the inflow carbon effect, but the period of influence of population factor is relatively long. The village production and living activities will produce huge carbon emissions, the village land change carbon emissions effect is obvious, we need to further regulate the development of local carbon emission reduction policies, reduce carbon emission land and add carbon sink land.

Key words: rural land transformation; influencing factors; carbon emission impact; spatio-temporal variety; Jiangsu Province

全球气候变暖及其所引发的环境危机已经对人类的生存提出了巨大挑战, CO₂ 大量排放是导致气候变暖的主要原因之一。为此, 我国提出了“2030 年达到碳达峰, 2060 年实现碳中和”的“双碳”目标^[1]。村庄是乡村人口最主要的生活活动空间, 村庄用地的碳排放/吸收效应也是国土空间利用碳效应的重要组成部分, 从村庄内部细分用地构成来看, 村庄的居住等细分建设空间因人类活动产生相应的碳排放效应, 而庭院、绿地植被与水体等非硬化区域则具有相应的碳汇等生态系统服务功能。从村庄细分国土空间类型视角出发, 开展微观尺度下村庄用地的碳效应研究, 以实现更高精度的村庄用地碳效应测算及其多因素影响评估^[2], 可以更准确的把握区域国土空间碳效应的机制机理, 从而为制定更具有针对性的减碳增汇路径提供支撑。

2023 年政府工作报告指出我国农村人口还有 5 亿左右, 如此庞大的人口带来的碳排放影响不可忽视。目前村庄碳效应研究涉及测算、影响评估及实证应用等方面。其中, 村庄用地碳排放测算大多根据村庄各类用地面积及碳排放系数进行测算^[3]; 村庄碳排放影响因素评估^[4-6]涉及到自然^[7-9]、能源^[10]、经济^[11-12]等, 评估方法根据研究尺度与信息数据特征确定, 统计回归^[13-15]、系统动力学^[14]、空间叠加分析^[16]等方法应用较为普遍。村庄碳排放实证研究涉及多尺度研究, 集中于国家、省、县等区域性农村农业生产^[17-20]、能源利用^[21-22]、低碳乡村建设^[23-25]碳排放, 基于农村内部用地细分碳排放研究有所不足; 已有的基于村庄内部细分用地碳排放研究, 多基于社区尺度针对个别村庄开展^[26-28], 这种微观方式虽有效提高碳排放精度, 但需要学者到村庄进行实地考察, 成本较高, 不具有区域推广性。总体来看, 现有村庄碳排放研究多集中于国家、省域等区域尺度, 测算精度不足, 而以具体村庄为研究对象, 虽提高了测算精度, 但成本过高, 推广性不足, 难以开展区域性、多尺度村庄碳排放研究。

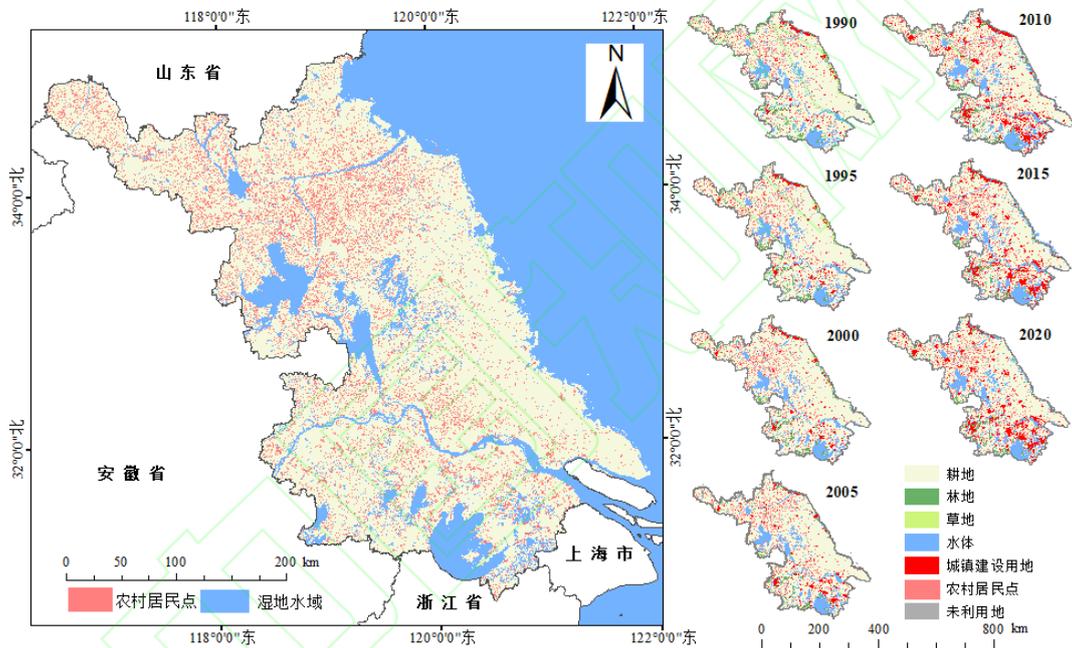
根据 2023 年度资料统计, 江苏省村庄面积占全省面积的 11%, 村庄人口密度达 1878 人 / km², 总人口占全省人口的 26.1%, 年乡村生活能源消耗油品 108.66 万吨, 电量 39.3 亿 kW·h, 居全国第 2, 是全国乡村人口占比以及能源消耗较高的省份, 资源与环境压力明显。因此, 江苏省农村经济社会发展与生态环境建设, 对我国乡村振兴发展具有重要意义。鉴于此, 本文在村庄用地内部细分空间识别的基础上, 应用碳排放系数法测算江苏 1990-2020 年村庄用地变化碳效应, 后采用重心模型和回归分析, 研究村庄用地变化碳效应及其自然与经济社会因素影响的时空分异特征, 旨在揭示村庄用地碳效应及其多因素影响规律, 为江苏省

制定村庄用地碳减排政策措施提供决策支持，助力“双碳”以及乡村振兴发展战略目标的实现。

1 村庄用地碳源碳汇分析及数据来源与处理

1.1 村庄用地碳源碳汇分析

村庄是指农村居民生活和生产的聚居点，是农村建设和发展的基本空间单元^[29]，多呈点状零散分布于广大乡村区域，单个规模较小，且村内地面硬化比例较低，主要为住宅和农业生产设施，庭院周边及内部夹杂菜园、庭院树、花圃及各类绿地植被^[27]。由于缺少明确的村庄边界，因此文中通过结合中科院土地利用分类数据中的农村居民点矢量（图 1）、高清影像中村庄道路、建筑轮廓确定村庄边界。



该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3266号的标准地图制作，底图无修改。

图 1 江苏省位置示意与 1990—2020 年间土地利用现状

Fig. 1 Location diagram and land use from 1990 to 2020 of Jiangsu Province

农村居民点碳排放是指农民生产生活集聚地区，因人类活动和自然界产生、吸收的温室气体的总和。村庄碳排放源主要来自村庄建造、生产建设、生活用能以及人口呼吸几方面^[25,27,30]。村庄建造碳排放主要来源于各类村庄建设活动^[25]，例如基础设施建设、道路硬化、房屋建造等日常建设活动；生产建设碳排放主要是指农业生产中的投入的农机、化肥产生的碳排放^[25,30]；生活用能碳排放指产生于村民满足日常生活、交通出行所消耗的柴薪、沼气、煤电、汽油等能源产生的碳排放^[27]。主要对应的是村庄内的居住、公服、道路、农业用地。村庄内部的碳汇主要来源于树木、低矮植被、水塘等，与林地、草地、水体、耕地及未利用地几类用地对应^[27,30]。因此当村庄用地因社会经济发展需求进行类型转换时，如公服建设、

拆迁撤并、土地复垦等，土地的碳排放特征也就发生了变化。文中尝试在村庄内部用地细分的基础上量化这种变化，并探讨背后的驱动因子。

1.2 数据来源与处理

文中数据涉及到土地利用、社会经济、地形地势、基础地理信息以及气温、降水等气象数据。其中 1990-2020 年 5 年一期的 30m 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；1m 分辨率土地覆盖数据、建筑高度矢量数据来自于 zenodo 平台；基础地理信息数据来源于全国地理信息资源目录服务系统的 1:100 万全国基础地理信息数据库；地形地势数据源于地理空间数据云 SRTM 数据集；年均降水、年均气温气候数据来源于国家青藏高原科学数据中心；产业产值、农村人口等社会经济数据来源于 1990-2020 年的《中国县域统计年鉴》、《江苏省统计年鉴》及《国民经济与社会发展统计公报》。缺失数据采用临近点平均值、线性回归进行插值补充。

2 村庄用地变化碳效应影响因素分析及指标体系构建

村庄用地变化碳效应是指村庄内部各类细分用地数量、布局、利用方式的变化以及村庄用地与其他国土空间利用类型之间的相互转变而导致的碳排放、碳汇变化效应，两类效应叠加为净碳排放效应^[28,31]。需强调的是村庄内部用地变化碳效应通过村庄碳排放的时空变化表示，文中所指的用地变化碳效应，主要是指村庄用地与其他国土空间利用类型之间的相互转变而导致的碳效应，但二者均为用地数量变化造成的碳排放效应。

村庄用地变化碳效应的影响因素主要包括自然、经济和社会因素。自然因素中的气候、地形地势、水源、植被等因素通过影响居民点分布格局、用地配置和城镇化进程，间接的影响村庄用地的碳排放效应^[28,31]。经济、能源、政策因素等社会经济因素均会对村庄内部土地利用格局产生影响^[25,27,32]：如良好的交通区位条件有利于降低运输成本从而提高投入产出效率，导致村庄内区位条件较好的用更易被占用，影响居民点内部的用地格局^[33]；经济发展水平越高，居民对于物质文化的需求水平就越高，相应的建设用地需求就会增加^[33-34]；人口总量、人口结构的变化会影响到人们对粮食和其他生产生活物质的需求，影响村庄的规模以及内部空间布局^[15,33]；“增减挂钩”“合村并居”等政策的实施，使得建设用地利用与村庄整治的关系越加密切，建设用地利用效率的提高，会降低了其在新增数量上的需求，从而减少城镇对农村用地配置的影响^[33-34]。

为揭示村庄用地变化碳效应及其多因素影响，需要构建指标体系并对影响因素进行分析。考虑数据的可获得性和代表性，选取表征村庄用地变化碳效应的驱动因素进行指标体系的构建（表 1）。

表 1 村庄用地变化碳效应影响因素类型与表征指标

Table 1 Types of driving forces and characterization indicators of carbon effect of village land use change

一级指标	二级指标	具体表征指标	数据来源
------	------	--------	------

自然因素	地形地势	高程 (m)	SRTM 数据, 空间分辨率 30m
		坡度 (°)	表面分析工具获取, 空间分辨率 30m
	水源距离	距离主要河流距离变化 (km)	近邻分析/欧氏距离
	气候条件	年均气温变化 (°C)	栅格数据, 空间分辨率 30m
年均降水变化 (mm)		栅格数据, 空间分辨率 30m	
社会经济因素	城镇化及人口因素	城镇工矿用地比重 (%)	土地利用栅格数据, 空间分辨率 30m
		城镇常住人口比重 (%)	统计公报与统计年鉴
		乡村人口密度 (人/km ²)	
	经济发展	农村人均可支配收入增长率 (%)	
		农民人均生活消费支出增长率 (%)	
		人均生产总值增长率 (%)	
		二、三产业产值占比 (%)	
交通条件	农村非农从业人员比重 (%)		
	距离普通公路的距离变化 (km)	近邻分析/欧氏距离	

3 研究方法

传统的乡村碳排放测算多基于个别村庄或社区或区域整体乡村数据展开,前者推广成本高,而后者精度不足^[14-15]。本研究尝试结合高清影像地图与各类土地利用空间数据细分乡村内部用地,从土地利用的角度出发构建具有推广性且精度相对较高的乡村碳排放测算体系。在此基础上,研究江苏省各县乡村总体碳排放和土地利用变化碳效应,丰富江苏省乡村碳排放时空分异格局与影响因素研究。

3.1 村庄内部用地信息提取

文中村庄内部用地信息提取思路是利用矢量数据确定样本村庄位置并获取高清影像,后采用交互式监督分类进行分类。获取 2020 年村庄内部细分用地比例,结合土地利用栅格数据获得 1990-2020 年江苏省村庄内部用地信息。因全省村庄用地数量过多,若全部选择,工作量太大,因此本研究采用随机抽样的方式选择村庄。考虑到本文以区县作为评估单元,在每个乡镇选取一个村庄,总数已达到 1069 个,各县区村庄的平均采样个数也达到 19 个,可以反应各县区村庄细分空间的基本比例结构信息;利用 2020 年村庄内部的细分空间面积比重预测 1990-2020 年全省村庄细分空间面积,主要是考虑到村庄细分空间面积比重虽然会随时间发生一定程度变化,但由于村庄居民生活习惯具有稳定性,细分用地布局变化应不会太大,且公开渠道也仅能收集 2020 年一个年度的 1m 分辨率土地覆盖数据,故文中假定研究期内村庄细分空间面积比重保持不变。这虽然会导致一定程度的误差,但本文研究的是全省村庄用地碳效应变化问题,该误差不会影响最终结论的整体正确性。

考虑到村庄用地、村民生活特点以及数据的可及性,最终确定村庄内部用地信息提取采用以下流程实现(图 2): (1) 以江苏省县区内的乡镇(街道)为基本单位,在每个乡镇(街道)随机选取一个村庄,最终获得村庄样本 1069 个; (2) 基于 2020 年 1m 分辨率土地覆盖数据中的建设用地信息确定村庄的矢量位置和大致形状,随后根据实际显示的村庄 Google

高清图周围的道路、建筑轮廓等对村庄边界进行调整，并以此确定村庄范围；（3）基于村庄用地范围对村庄内部进行空间细分，可划分为耕地、林地、草地、水体、未利用地、建设及道路用地六种类型，采用基于人机交互的监督分类进行提取，具体过程如下：在利用矢量获得村庄的高清影像后，利用 arcgis 软件自带的影像分类工具中的交互监督分类进行分类，其内部默认参数调用的是最大似然分类工具，具体过程包括加载高清影像，选择波段子集，根据要分类的用地类型（耕地、林地、草地、水体、建设与道路用地、未利用地）面积，创建不同数量的训练样本，对训练样本进行评估后再执行交互式监督分类，从而得到村庄内部用地细分结果，据此测算各样本村庄内部的细分空间面积比重；（4）利用 1990-2020 年江苏省 30m 分辨率土地利用栅格数据获取各期村庄面积，再结合细分空间面积比重测算出 30 年间全省村庄各期细分空间面积。

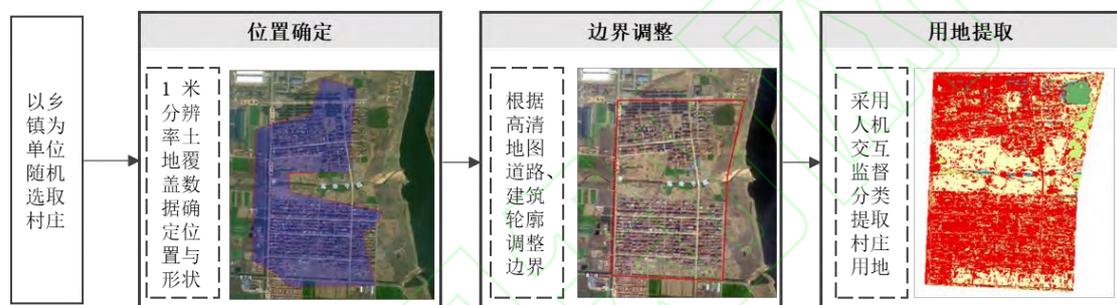


图 2 村庄内部用地提取过程

Fig. 2 Process map of land extraction in the village

需补充说明的是，村庄内部用地提取六类用地并非传统意义上国土空间用地类型所指的耕地、林地、草地、水体、未利用地、建设及道路，这里的耕地、林地是指分布在庭院周边和内部的菜园子和庭院树种植用地，草地是指村庄内部的杂草、低矮植被生长地及绿化草地，未利用地主要指村庄内部未经利用或荒废的裸地，水体主要是穿过村庄内部的部分河流、沟渠以及满足村民浇灌菜园、花圃等需求的天然或人工的小水塘，建设及道路是指村庄内部道路、住宅、农业设施、公共设施等用地。根据这几类用地的碳排放特征，以及对应的碳排放系数，故沿用国土空间用地类型名称。

村庄外部用地则参考自然资源部关于印发《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》的通知（自然资发〔2023〕234号）^[35]，也将其分为耕地、林地、草地、水体、未利用地、建设及道路六大类，这部分用地分类数据直接采用中科院30m土地利用栅格数据结果进行统计。

3.2 村庄碳排放及用地变化碳效应测算方法

参考《城市温室气体排放测算国际标准（草）》（以下简称标准）对城市温室气体测算尺度的划分^[36]和村庄的概念，文中碳排放核算边界包括发生在存在边界内所有温室气体的直

接碳排放过程以及由于电力、供热的购买和外调发生的间接碳排放过程（对应标准中温室气体测算尺度 1，尺度 2）。村庄用地变化既包括村庄与外部其他用地类型之间的转化，也包括村庄内部利用类型、利用强度或利用效率的变化，上述两类变化均会导致相应的碳排放、碳汇效应，统称为用地变化碳效应。其中，村庄与其他用地类型之间的相互转化主要依靠中科院 30m 土地利用栅格数据的土地利用转移矩阵完成量化，引起碳效应变化量的计算公式为

$$\begin{cases} E_{RIC} = C_{RI} - C_{Li} & \text{流入（其他用地类型转化为村庄用地）} \\ E_{RIC} = C_{Li} - C_{RI} & \text{流出（村庄用地转化为其他用地类型）} \end{cases} \quad (1)$$

式（1）中， E_{RIC} 为村庄变化碳效应， C_{RI} 为村庄净碳排放， C_{Li} 为第*i*种土地类型净碳排放，单位均为 t/hm^2 。基于数据的可获得性，各类用地碳排放测算方法见表 2。

表 2 村庄/城镇用地碳排放测算公式表

Table 2 Calculation Formula for Carbon Emissions from Village or Urban Land

碳效应类型	测算公式	变量解释
村庄/城镇用地净碳排放效应	$CE_{RI (Ub)} = CE_{Eng} + CE_{Pop} + CA_{Build} + CA_{veg}$ $CE_{Eng} = \sum Cnsmp_{Eng_i} \times E_{Eng_i}$ $CE_{Pop} = \sum P_{Pop} \times E_{Pop}$ $CA_{Build} = \sum Area_{Bld_i} \times A_{Bld_i}$	CE_{RI} 为村庄用地净碳排放量， CE_{Ub} 为城镇碳排放，右侧变量依次为该用地范围内能源消耗与人口呼吸碳排放，以及建筑与植被碳汇； 右侧变量依次为第 <i>i</i> 类能源消费量及碳排放系数（scope1，scope2；参见文献[37]）； 右侧变量依次为人口数量及人口呼吸碳排放系数（scope1；参见文献[38]）； 右侧变量依次为第 <i>i</i> 类建筑的建筑面积及单位面积建筑碳吸收系数（scope1；参考文献[39]）；
耕地、林地、草地、水域与未利用地碳汇效应	$CA_{LU_i} = Area_{LU_i} \times E_{LU_i}$	CA_{LU_i} 为耕地、林地、草地、水域或未利用地的碳吸收量，右侧变量依次为该类土地的面积与碳汇系数（scope1；参考文献[40-41]）；

村庄内部细分耕地：耕地碳排放包括农业生产过程中投入化肥、机械等农用物资产生的碳排放，以及作物生长过程中的碳汇。文中村庄耕地主要指村庄内部满足居民日常生活需要的菜地、农田等，以区县内各类作物类型、农用物资、农作物产量和耕地面积为基础，采用碳排放系数法进行测算，相关碳排放系数通过 IPCC 和各类文献获取^[42-43]，部分碳排放系数如下：化肥(N)0.857t/t、化肥(P, K)0.143t/t、农药 4.9341 t/t、农膜 5.18 t/t、翻耕 0.3126t/km²、电力灌溉 0.025 t/km²、柴油 0.5927 t/t 等。

村庄内部细分建设用地：考虑到村庄内部建设用地主要为住宅，生产类建设用地所占比重极少，因此主要考虑生活能源、建筑和人类呼吸产生的碳排放。由于难以收集县区能源消耗数据，本文以江苏省历年各类能源消费数据及其碳排放系数为基础^[37]，计算江苏省农村生活能源消费碳排放，随后利用历年县区村庄建设面积占全省比例进行分配；人类呼吸碳排放量采用碳排放系数法根据各县区农村人口进行测算，碳排放系数根据相关研究取值为 0.079 t/a^[38]；建筑碳排放首先以各县区村庄样本中建筑面积比重结合村庄面积与建筑层数，计算各年农村建筑面积，然后以相关研究中的住宅建筑碳排放系数为基础进行测算，其中建筑层数根据现场调研确定为 2 层。

村庄内部细分林地、草地、水域与未利用地均采用碳排放系数法进行测算，碳排放系数根据相关研究成果分别取值-0.581^[44]、-0.021^[15]、-0.257^[41]与 0.005 t/hm².yr^[41]。

3.3 城镇用地碳排放测算方法

城镇用地是村庄用地的主要流出方向之一,碳排放测算整体思路与村庄用地类似。但与村庄不同的是,城镇建设用地承载着居民生产、生活双重活动,因此城镇用地中建设用地能源碳排放也包括非农生产生活能源消费碳排放,采用单位GDP能耗碳排放配置至各个区县;将城镇内部林地、草地、未利用地归并为城市绿地进行测算,利用绿化率、城镇用地面积、全国100万植被类型图及植被碳汇系数测算城镇用地植被碳汇^[41];考虑到水体占比较小以及具体数据难以获取,这里未将水体纳入城镇用地碳排放测算范围。

3.4 村庄碳排放及用地变化碳效应分析方法

3.4.1 村庄碳排放及用地变化碳效应空间格局分析

村庄碳排放及用地变化碳效应空间格局分析,采用全局莫兰指数和局部莫兰指数进行研究。全局莫兰指数是全局相关分析中最为常见的统计量,主要用于描述区域中空间单元与周围地区的平均关联度^[2]。本文农村居民点碳排放以及用地变化碳效应全局莫兰指数计算公式为

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

局部莫兰指数可以发现区域中呈集聚现象的空间单元,能够有效的弥补全局莫兰指数无法确定集聚现象的空间位置这一空缺^[2]。局部莫兰指数的计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}), \quad (3)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2}{n-1} - \bar{x}^2 \quad (4)$$

式(3)~(4)中, I_i 为局部莫兰指数; x_i 、 x_j 分别为单元 i 、 j 的变量值, W_{ij} 是空间权重矩阵; n 为空间单元的数量。

3.4.2 村庄碳排放及用地变化碳效应时空变化趋势分析

本文采用重心模型分析村庄碳排放及用地变化碳效应时空变化趋势。重心模型是一种利用要素平均中心反映要素在空间上的平衡性的重要模型,后应用GIS空间可视化功能实现研究区相应的重心转移轨迹制图,可以有效直观的描述要素的时空分布特征和发展方向^[37]。本文中农村居民点碳排放以及用地变化碳效应几何重心坐标采用下述公式计算:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \times E_i}{\sum_{i=1}^n E_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \times E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (5)$$

式(5)中, X 、 Y 为某一时期区域农村居民点碳排放以及用地变化碳效应的几何重心坐标, X_i 、 Y_i 为第 i 单元中心坐标, E_i 为第 i 单元农村居民点碳排放以及用地变化碳效应。

3.4.3 村庄用地变化碳效应影响因素分析

多元逐步回归模型是一类经典的用于分析解释变量对研究现象影响作用的方法,适用于从大量数据中确定模型中不同要素的关联性和重要性^[13,37]。相比于地理探测器、地理加权回归等空间方法,多元逐步回归模型对于数据分布、数量以及空间分辨率要求较低^[19]。本文以区县为基本研究单位,因此,采用多元逐步回归模型确定村庄用地变化碳效应的影响因素更

为适合。本文农村居民点用地变化碳效应影响因素逐步回归模型计算公式为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m \quad (6)$$

式(6)中, x_1, x_2, \dots, x_m 为被选择包含在模型中的农村居民点用地变化碳效应, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 是自然因素、社会因素等影像因子的回归系数。

4 结果与分析

4.1 村庄碳排放时空分异

4.1.1 净碳排放总量时空分异

30年间全省各县区村庄净碳排放均为正值,呈典型的碳源效应,其中建设用地中生活能源、建筑与人口呼吸的净碳排放比重依次降低,村庄内部细分耕地碳汇效应最强。从时间尺度具体来看,以2005年为界,呈现出先减少后增加的特征:(1)1990-2005年间,多数区县村庄内部的碳汇量有所增长,生活能源碳排放显著下降,建筑和人口呼吸碳排放保持稳定,总体碳排放呈下降趋势;(2)2005-2020年间,多数区县村庄碳汇、碳排放均有所增长,但碳排放增量要高于碳汇增量,故整体上各区县村庄的碳排放处于增长状态。

空间分布来看(图3):(1)村庄净碳排放呈西高东低的空间分布特征,此外,市辖区村庄碳排放高于其它县区;几何重心一直位于中西部淮安市,进一步验证了前述西高东低的空间格局;(2)重心移动轨迹呈明显的“西北-东南”方向迁移特征,表明苏北与苏中各县区村庄净碳排放占全省比重整体呈降低趋势。由于苏北苏中各县区是全省人口流出的重点区域,且是全省城乡建设用地增减挂钩等复垦项目实施的重点区域,村庄用地面积减少较为显著;相对而言苏南地区乡镇企业较为发达,一直是人口流入热点区域。上述两类因素叠加下,使得苏南各县区村庄内部建设用地碳排放总量相对苏北占比更高,从而产生上述变化轨迹。

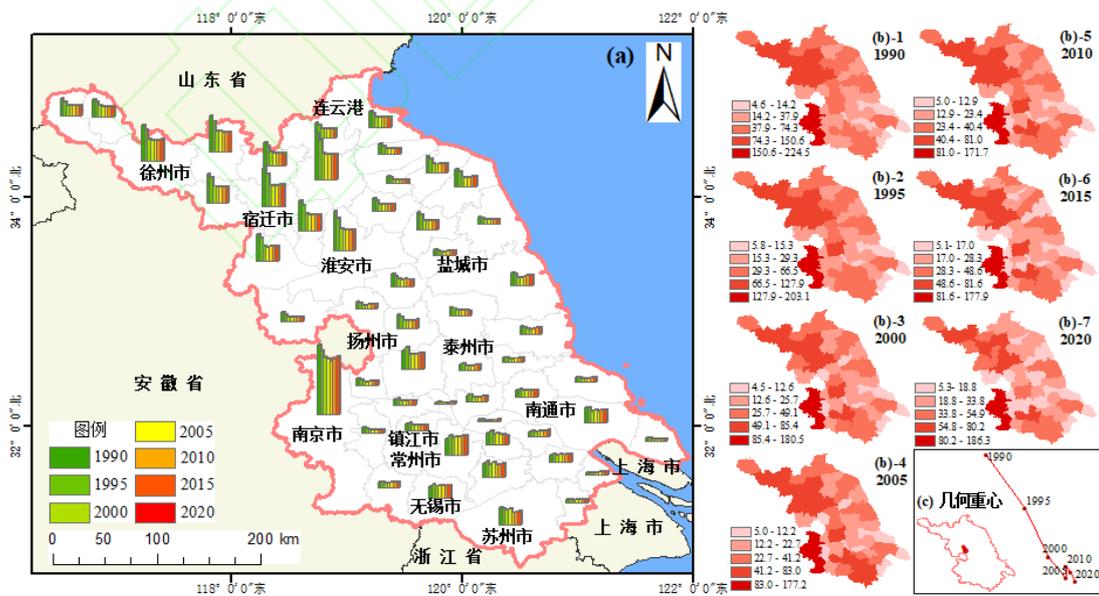


图3 村庄碳排放总量时空分布图(图a,图b;单位:万吨)及重心迁移图(图c)

Fig. 3 Spatio-temporal distribution of village carbon emissions and center of gravity migration

4.1.2 地均净碳排放强度时空分异

为进一步分析全省碳排放的时空差异,现对各区县的地均碳排放进行计算。结果(图4)显示:(1)全省各县区村庄地均净碳排放均为正值且30年间持续降低;(2)从空间分布格局来看,30年间全省各县区从南到北均呈现较明显的梯度递减特征,但苏中的南通、苏北的徐州和盐城部分县区地均净碳排放相对较高;(3)重心分析结果显示,30年间地均净碳排放强度重心均位于扬州市,但移动轨迹呈“东南—西北”迁移特征,这表明西北部分县区碳排放强度下降速度相对较慢,从而导致其在全省所占比重相对逐渐增大。

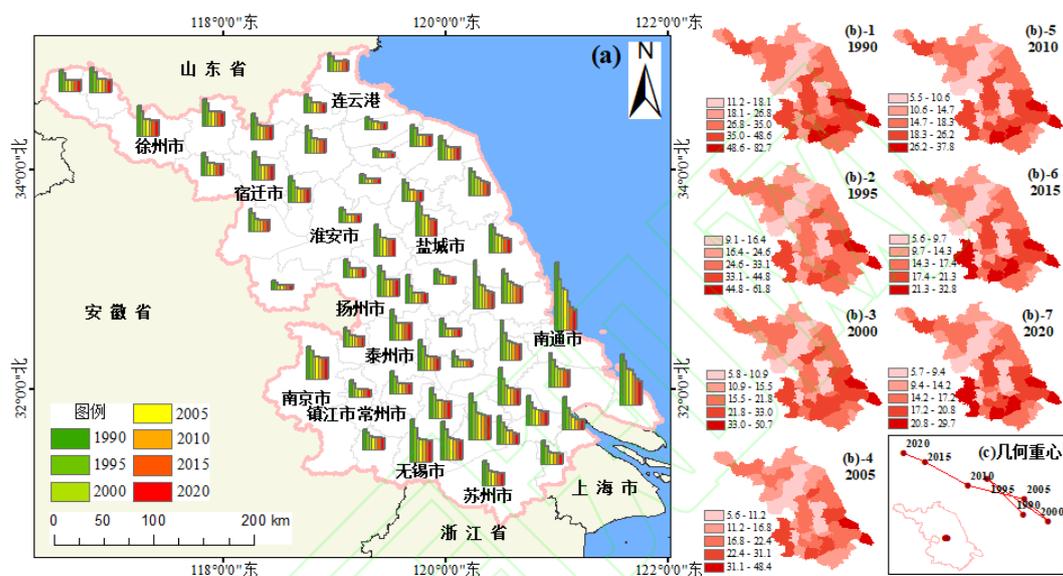


图4 村庄地均碳排放强度时空分布图(图a,图b;单位: t/hm^2)及重心迁移图(图c)

Fig. 4 Spatio-temporal distribution of average carbon emission intensity in a village and center of gravity migration

采用莫兰指数对地均碳排放强度进行分析,结果显示:全局莫兰指数的变化区间在[0.215, 0.341],均通过1%的显著性检验,表明地均净碳排放强度具有显著的空间正相关性。但全局莫兰指数由1990年的0.341降到2020年的0.215,表明地均净碳排放强度在研究期内趋同性减弱,内部差异性加大。局部莫兰指数分析结果(图5)显示:(1)低值集聚于苏北宿迁、连云港与淮安部分县区,说明这三个市区内的县区碳排放强度相较于周边地区均较弱,形成低碳排放集聚中心;其重心移动轨迹呈“东南-西南-东北-南,但整体向东南”的迁移特征;(2)高值集聚于苏中南通的如皋、如东与南通市区,其重心移动轨迹呈“西南-东北-西南,但整体向西南”移动的变化特征;(3)高-低、低-高两类集聚分布相对较少,集中出现在2010年以后的沭阳县、苏州市区、仪征市三个县区。

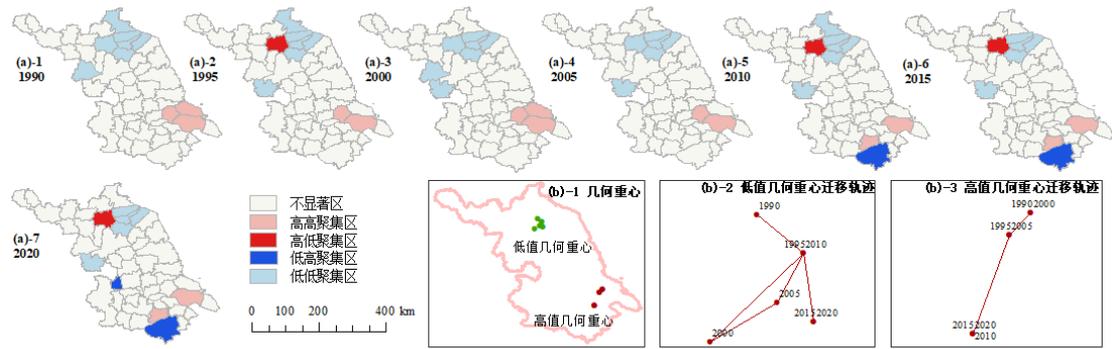


图 5 村庄地均碳排放强度局部莫兰时空分布图 (图 a) 及重心迁移图 (图 b)

Fig. 5 Local Moran spatiotemporal distribution map of average carbon emission intensity in villages and center of gravity migration

4.2 村庄用地变化的碳效应时空分异

4.2.1 其他用地流入村庄的碳效应

全省各县区流入碳效应呈碳排放效应, (1) 2005年以前, 所有区县的流入碳效应均呈碳排放效应。2005年以前村庄扩张占用了大量的耕地、林地、草地等呈吸收效应的用地类型, 故导致上述现象的产生; (2) 2005-2010期间, 苏中和苏南地区有部分区县开始呈碳汇效应。考察该时期土地利用变化发现该部分区县因后备土地资源相对苏北尤其不足, 再叠加耕地保护制度的实施, 使得流入村庄的用地类型呈吸收效应的土地类型占比较小, 从而导致城镇工矿用地比重相对较大, 从而呈上述空间分布规律。考虑到实际上城乡建设用地之间的转换多为单向流动, 这应是使用数据存在的原始误差所导致; (3) 2010-2020年间, 城镇工矿用地流入水平开始与2005年以前的流入水平相似, 因此大部分区县流入碳效应呈碳排放。

从空间分布来看 (图6), (1) 其它用地类型流入村庄所产生的碳排放总量总体呈南高北低、西高东低的分布格局; (2) 重心集中在省中西部的扬州市区, 进一步佐证了上述空间格局; (3) 重心迁移轨迹始终围绕着扬州市区周边向西北方向移动, 表明30年间徐州等苏北部分区县其他用地类型流入村庄产生的碳排放相对苏南增长更快。

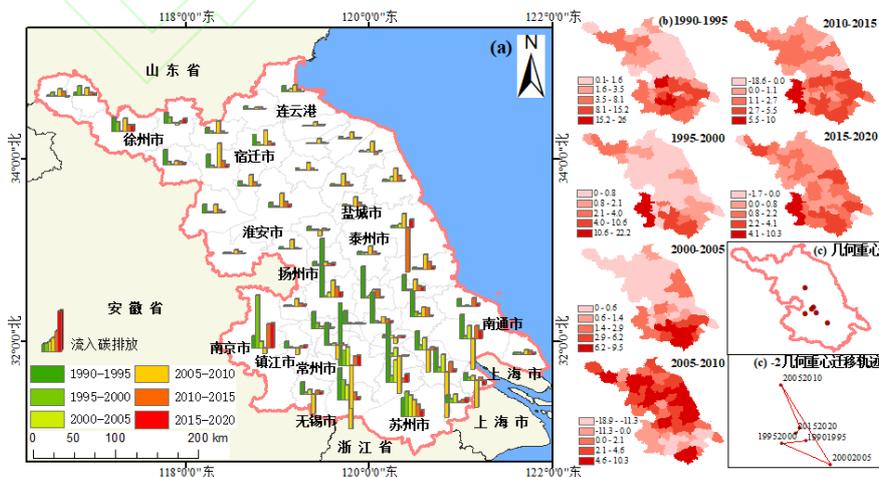


图 6 流入碳效应总量 (图 a, 图 b; 单位: 万吨) 及重心迁移图 (图 c)

Fig. 6 Total inflow carbon effect and center of gravity migration

4.2.2 村庄流出其他用地的碳效应

从时间尺度来看,全省大部分县区村庄流出碳效应呈碳汇效应,以2005-2010年为界,呈“吸收-排放-吸收”的变化趋势;从空间分布上看(图7), (1)不同年度区间江苏省村庄流出碳效应空间分布差异较大,总体上呈南高北低、西高东低的趋势。(2)重心集中于中西部的扬州市、泰州市与镇江市内,呈明显的“西北-东南-西北”迁移特征,说明苏北、苏中各县区村庄流出碳效应比重在30年间呈先降低后升高的趋势。

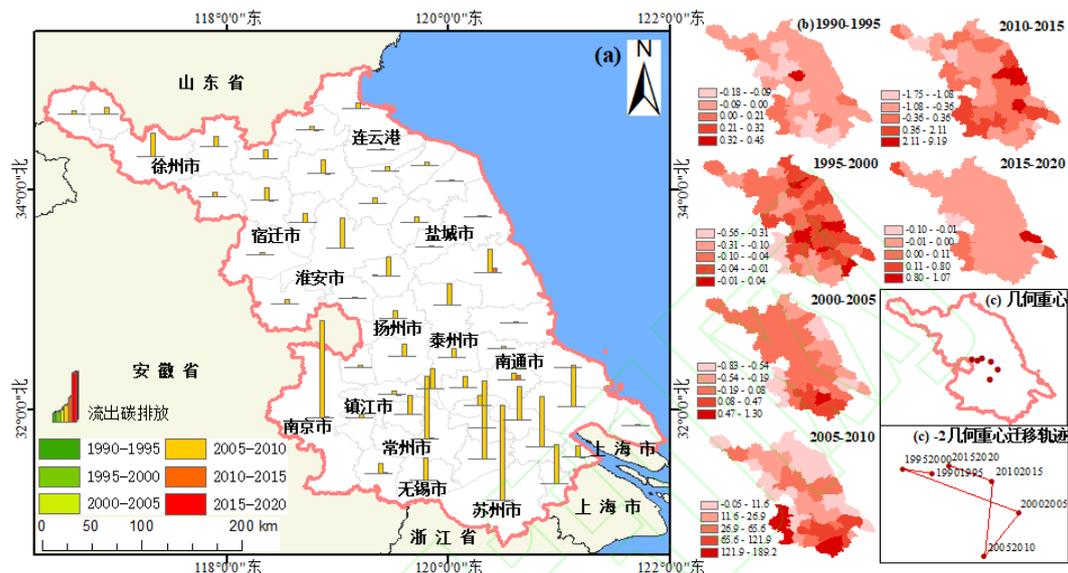


图7 流出碳效应总量(图a,图b;单位:万吨)及重心迁移图(图c)
Fig. 7 Total outflow carbon emission effect and center of gravity migration

4.2.3 村庄用地变化综合碳效应

时间尺度上看,全省村庄用地变化碳效应多呈碳排放效应,年际变化较为无序。从空间格局上看(图8), (1)全省西南与西北部分县区碳排放相对较高(其30年间几何重心也主要位于苏中南的扬州市),但东西格局上分布比较无序,碳效应年际之间变动较大;(2)重心迁移轨迹整体向西北方向移动,与其他用地流入村庄碳排放效应移动轨迹类似。

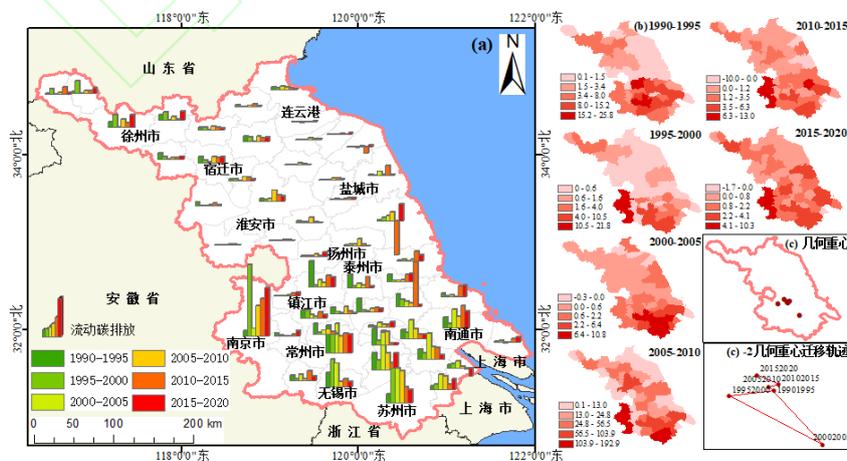


图8 流动碳效应总量(图a,图b;单位:万吨)及重心迁移图(图c)
Fig. 8 Total amount of flowing carbon effect and center of gravity migration

4.3 村庄用地变化碳效应影响因素分析

4.3.1 村庄用地变化碳效应全局影响因素分析

在基于全局逐步回归的村庄用地变化碳效应影响因素分析结果显示，流入、流出、流动碳效应的影响因素的显著性（ R^2 ）分别为0.452，0.683和0.739，回归系数均通过1%的显著性检验，可以看出文中影响因素体系对流出、流动碳效应的解释程度较高。各类碳效应具体分析结果如下：

（1）村庄用地流入碳效应全局影响因素分析结果（图9）表明：影响因素中的年均降水、村庄距河流距离及乡村人口密度变化三个因素，对村庄用地流入碳效应影响较为显著（ R^2 为0.452， p 值均小于0.01），其中：①自然因素中年均降水（-0.178）与村庄距河流距离（-0.127）两项指标对流入碳效应影响均为负向，说明年均降水增长会促进其他用地流向村庄，村庄离河流越远越会限制其他用地流向村庄，这是由于村庄对外扩张会优先考虑水源条件较为优越的地带；②社会因素中乡村人口密度变化（-0.201）也呈负向贡献，说明人口密度的增大会抑制其他用地流向村庄，由于村庄向外扩张主要占用的为耕地，当村庄人口增多时，对耕地的需求量也随之增大，因此人口密度越大对耕地的侵占也就越少。

（2）村庄用地流出碳效应全局影响因素分析结果（图9）表明：村庄距河流距离、城镇用地比重、村庄人口密度、村庄距道路距离四个因素对村庄用地流出碳效应影响较大，解释程度较高（ R^2 为0.683， p 值均小于0.01），其中：①自然因素中村庄距河流距离变化（0.371）对流出碳效应具有正向贡献，考虑到村庄用地主要流向耕地与城镇用地，流出碳效应总体呈碳汇效应，数值上为负，说明在“增减挂钩”、“占一补一”等土地政策实施时会考虑水源条件较好的村庄，同时水源条件优越的村庄也更易被城镇用地侵占；②社会经济因素中城镇用地比重（0.781）、村庄人口密度（0.078）呈正向贡献、村庄距道路平均距离（-0.278）呈负向贡献，表明随着城镇化水平的提升，城镇化朝旧城改造、存量更新等提高土地利用效率的方向转变，城镇用地对村庄的侵占力度逐渐减小，且人口越多、交通条件越便利、自身发展条件越好的村庄越不易被占用，事实上这一类村庄在乡村振兴中是集聚提升和重点发展的主要对象。

（3）村庄用地流动碳效应全局影响因素分析结果（图9）表明：在全局逐步回归分析中城镇工矿建设面积（0.828）、村庄距河流（0.326）、道路距离（-0.26）对流动碳效应具有较大（ R^2 为0.739， p 值均小于0.01），说明城镇化、水源、交通条件是导致村庄用地与其他用地类型相互转变的主要影响因素。结合前文流入、流出碳效应影响因素分析可知城镇化水平较低、交通条件较差、水源条件较好的村庄区域更容易成为各类用地政策的实施对象。

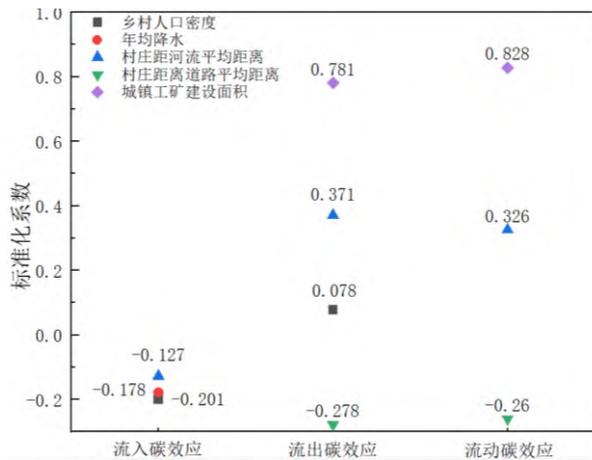


图9 村庄用地变化碳效应影响因素及全局逐步回归标准化系数

Fig. 9 Factors affecting carbon effect of village land use change and standardized coefficient of global stepwise regression

4.3.2 村庄用地流动碳效应分年度影响因素分析

分年度逐步回归的村庄用地变化碳效应影响因素分析结果显示,文中构建的影响因子体系能在一定程度上解释流入、流动碳效应,对流出碳效应的解释程度不高。其中,流入碳效应影响因素的显著性 R^2 位于区间[0.321-0.668],流动碳效应位于[0.435-0.651],回归系数均通过1%的显著性检验。可以看出,分年度回归分析中,文中影响因素体系对流入、流动碳效应的解释程度较高,且相对更适应于流动碳效应。其中,各类碳效应具体分析结果如下:

(1) 村庄用地流入碳效应分年度影响因素分析结果(图10-a)显示:自然因素中村庄到河流的平均距离在2005-2010年间具有正向影响,其他三个时期内的影响为负向,坡度因素在2000-2005年间影响为正,2005-2010年间则为负向影响,这是由于在不同年份村庄对外扩张的需求是不同的,因此自然因素的影响方向也就不同。

社会经济因素中:①乡村人口密度和第一产业比重对2005年之前的流入碳效应均具有显著负向影响,其中人口密度的影响更大。人口密度、第一产业比重呈负向贡献,人口密度越大、第一产业比重越高村庄对耕地的需求越大,限制了村庄对耕地的侵占,减少了流入碳排放;②2005-2015年间,人均GDP、农民人均生活消费与村庄距道路平均距离则成为显著影响的几类因素,表明社会经济发展对村庄流入碳效应的影响在提高并逐渐成为主导因素。其中:人均GDP呈正向贡献,说明社会经济的发展会加强村庄对外扩张,寻求外界资源的进入和生活条件水平的改善;村庄距道路平均距离呈正向贡献,农民人均生活消费呈现负向贡献,良好的交通条件会促使村庄经济发展,进而向外侵占耕地、林地、草地等,间接促进流入碳排放。当生活条件到一定程度后,随着村庄内部青壮年人口的流失,反而会限制村庄的扩张,这也在一定程度上解释了农民人均生活消费与流入碳排放是负相关的现象。

(2) 村庄流出碳效应分年度影响因素分析结果中,并未找出对其有显著性贡献的解释变量,这可能是因为村庄流出的主要原因为城乡建设用地挂钩与土地综合整治等项目的实施所导致,而这两类项目的实施更多的是通过上级财政支持的方式开展,其政策倾向性与地方

政府的积极性掩盖了其他自然与经济社会因素的影响，需进一步深入的分析。

(3) 村庄用地流动碳效应分年度影响因素分析(图10-b)表明：流动碳效应是指流入碳效应和流出碳效应的总和，村庄用地在研究期间一直处于扩张的状态，导致流入碳效应的贡献程度要远远超过流出碳效应，因此流动碳排放的影响因子与流入碳效应的影响因子相对一致，但总体的解释程度要优于流入碳效应，说明影响因子体系更适用于解释农村整体的用地变化活动。值得一提的是人口因素对流动碳效应的影响周期要长于流入碳排放，说明对于村庄整体和村庄流入其他土地利用类型碳效应来说，人口的影响具有显著性和持续性，是村庄用地变化碳效应的重要影响因素。

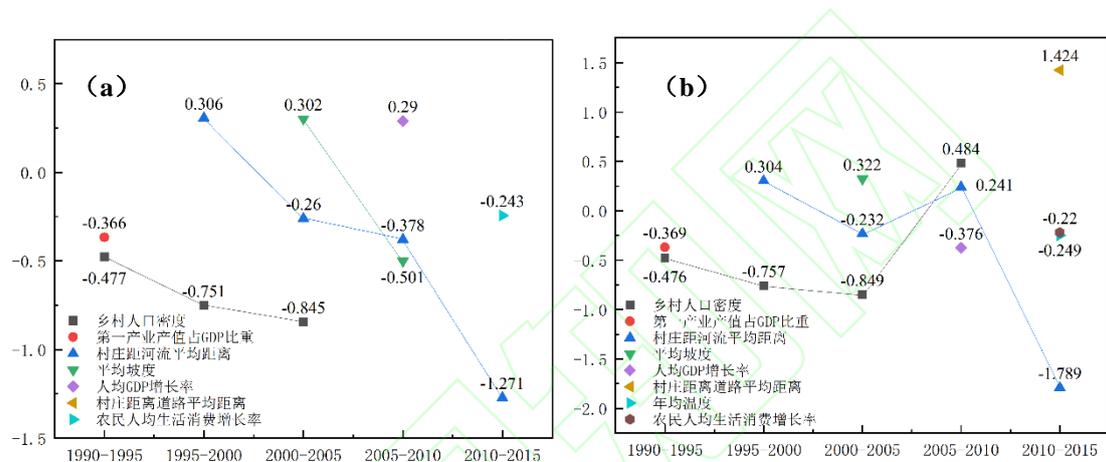


图 10 村庄用地变化碳效应流入 (a)、流动 (b) 影响因素及年度逐步回归标准化系数

Fig. 10 Factors affecting the inflow (a) and flow (b) of carbon effects from changes in village land use and standardized coefficients for annual stepwise regression

综合村庄用地变化碳效应全局、年度影响因素分析结果发现，人口数量、居住条件、城镇化水平、经济条件以及产业结构对村庄用地变化碳效应都具有较大影响，最主要的影响因素是前面三者。影响因素类型与目前村庄碳排放影响研究的结论较为一致^[4-5]，但因素的影响重要程度存在差异，部分研究指出经济条件与居住条件是主要影响因素^[10-12]，而人口数量影响反而较弱，也有研究指出消费方式、产业结构影响最大^[15]，差异的存在与研究对象所在区域的自然、社会、经济条件、地方政策以及自身所处发展阶段的不同相关。

5 结论

村庄是乡村人口最主要的生活活动空间，村庄内部用地既包括具有碳源效应的建设用地空间，也包括具有碳汇效应的庭院种植、绿地与水体等细分农业与生态空间。研究村庄内部细分用地空间类型的碳效应及其多因素影响，可以实现更高精度的村庄用地碳效应测算及其多因素影响评估，并据此提出更有针对性的减碳增汇措施。本文的实证研究结果表明：

(1) 村庄碳排放分析结果显示：①30年间全省各县区村庄净碳排放呈典型的碳源效应，其中建设用地中生活能源、建筑两类碳排放，以及人口呼吸的净碳排放比重依次降低，村庄

内部的耕地碳汇效应最强；②时间上以2005年为界呈先减后增的变化特征，空间上呈西高东低的分布格局，但苏北与苏中各县区村庄净碳排放占全省比重整体呈降低趋势；③全省各县区村庄地均净碳排放均为正值且30年间持续降低，空间上从南到北呈梯度递减特征，但全省西北部分县区碳排强度下降速度相对其他县区较慢；④全省地均净碳排放强度具有显著的空间正相关性，但趋同性减弱，内部差异性加大。其中低值集聚于苏北宿迁、连云港与淮安部分县区，高值集聚于苏中南通的如皋、如东与南通市区。

(2) 村庄用地变化碳效应分析结果显示：①从村庄用地的流入流出来看，全省各县区流入碳效应呈碳排放效应，空间上总体呈南高北低、西高东低的分布格局；②30年间全省大部分县区村庄流出其他用地呈碳汇效应，时间上以2005-2010年为界，呈“吸收-排放-吸收”的变化趋势，空间上总体上呈南高北低、西高东低的分布格局；③综合来看，全省村庄用地变化碳效应多呈碳排放效应，但年际变化较为无序，空间上西南与西北部分县区碳排放相对较高，但东西格局上分布比较无序。

(3) 村庄用地变化碳效应影响因素分析结果显示：①全局影响因素分析表明，村庄用地流入的碳效应影响中，自然因素中的年均降水与村庄距河流距离对呈负向影响，社会经济因素中乡村人口密度变化也呈负向贡献；流出影响中，自然因素中的村庄距河流距离具有正向贡献，社会经济因素中城镇用地比重、村庄人口密度呈正向贡献、村庄距道路平均距离呈负向贡献；②分年度影响因素分析表明，村庄人口、河流距离、第一产业比重等因素是流入碳效应的主要影响因素，但强度与方向在不同年度区间并不相同；流入流出的综合碳效应影响因素与流入碳效应相似，但人口因素影响周期相对较长。

基于本文研究结果，村庄用地碳排放效应明显。因此，加强村庄用地结构的优化调整并积极推动居民采用绿色节能低碳生活方式，可进一步助力江苏“双碳”目标的实现。具体措施为：通过制定“三块地”改革的政策措施，提高村庄集体经营性建设用地利用效率，重新配置利用闲置宅基地，减少村庄对耕地、林地、草地等碳汇效应明显的用地的占用；加强省内耕地与永久基本农田保护、城乡建设用地增减挂钩以及土地整治政策的实施力度，以抑制村庄对外无序扩张的冲动，既减少村庄对耕地的占用，又进一步补充碳汇用地；在绿色低碳生活方面，则可以通过推行绿色能源、绿色种植、绿色交通等手段，在保证村民基本生活质量不降低的前提下，减少煤炭、木柴、农用物资的使用，从而降低村庄居民生活与农业生产活动碳排放。

本研究揭示了1990-2020年江苏省县域村庄用地碳排放、用地变化碳效应的时空演变特征，并进一步探讨村庄用地与其他用地变换碳效应的影响因子，成果可为制定相应的减碳增汇对策提供科学的决策支持，也可为其他地方开展此类工作提供方法参考。但限于数据可及性，文中村庄用地仅基于有限样本点数据进行分类，未来还需进一步提高村庄内部用地细分精度，开展多尺度村庄用地变化碳排放时空格局研究。文中构建的影响因素体系对流出碳效应的解释程度较低，未来还需从土地政策、政府决策角度出发，探讨流出碳效应影响因素，

进一步厘清村庄用地变化碳效应的影响体系，为制定更具针对性、科学性的政策提供参考。

参考文献:

- [1] 赵先超, 牛亚文, 肖杰, 等. 基于土地利用变化的岳阳市碳排放时空格局研究[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1):10-19, 2. [ZHAO Xian-chao, NIU Ya-wen, XIAO Jie, *et al.* Spatial and Temporal Pattern of Carbon Emissions in Yueyang City Based on Land Use Change[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(1):10-19, 2.]
- [2] 全文露, 李丁, 李田田, 等. 江苏省县域碳排放的时空动态格局[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(5):165-173. [TONG Wen-lu, LI Ding, LI Tian-tian, *et al.* Spatial-Temporal Dynamics of County Carbon Emissions in Jiangsu Province[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(5):165-173.]
- [3] 刘子衡. 乡村场景碳源碳汇类型体系与减源增汇营建策略研究:以北京门头沟丁家滩村为例[D]. 北京:北方工业大学, 2023. [LIU Zi-heng. Types of Carbon Source and Sink in Rural Scenes and the Construction Strategy of Reducing Carbon Sources and Increasing Carbon Sinks: Taking Dingjiatan Village, Mentougou, Beijing as an Example[D]. Beijing: North China University of Technology, 2023.]
- [4] TIAN Y, WANG R, YIN M H, *et al.* Study on the Measurement and Influencing Factors of Rural Energy Carbon Emission Efficiency in China: Evidence Using the Provincial Panel Data[J]. Agriculture, 2023, 13(2):441.
- [5] WANG Y, ZHANG L Y, ZHANG Y, *et al.* Evolution Characteristics of Rural Carbon Emissions in Northwest China from 2006 to 2019[J]. Environmental Research Communications, 2023, 5(10):105002.
- [6] LI H, LUO Z X, XU X D, *et al.* Assessing the Embodied Carbon Reduction Potential of Straw Bale Rural Houses by Hybrid Life Cycle Assessment: A Four-Case Study[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 303:127002.
- [7] FENG H C, WANG R N, ZHANG H. Research on Carbon Emission Characteristics of Rural Buildings Based on LMDI-LEAP Model[J]. Energies, 2022, 15(24):9269.
- [8] ZHU X Q, ZHANG T C, GAO W J, *et al.* Analysis on Spatial Pattern and Driving Factors of Carbon Emission in Urban-Rural Fringe Mixed-Use Communities: Cases Study in East Asia[J]. Sustainability, 2020, 12(8):3101.
- [9] WANG Z H, YANG Y T. Features and Influencing Factors of Carbon Emissions Indicators in the Perspective of Residential Consumption: Evidence from Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 61:634-645.
- [10] WANG J, XUE D Q, WANG M, *et al.* Influencing Factors and Mechanism of Rural Carbon Emissions in Ecologically Fragile Energy Areas: Taking Ejina Banner in Inner Mongolia as an Example[J]. Sustainability, 2022, 14(12):7126.
- [11] DU L Z, WANG X P, ZHANG S X. Can Rural E-Commerce Contribute to Carbon Reduction? A Quasi-Natural Experiment Based on China's E-Commerce Demonstration Counties[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(47):104336-104349.
- [12] SONG L M, XU F, SHENG M, *et al.* The Relationship between Rural Spatial Form and Carbon Emission—A Case Study of Suburban Integrated Villages in Hunan Province, China[J]. Land, 2023, 12(8):1585.
- [13] 张千禧, 曹智, 王介勇. 双碳视角下乡村地域系统碳效应研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(8):1256-1274. [ZHANG Qian-xi, CAO Zhi, WANG Jie-yong. Research Progress of Rural Regional System Carbon Effect from the Perspective of Dual Carbon[J]. Chinese Journal of

Eco-Agriculture, 2023, 31(8):1256-1274.]

- [14] 刘静. “双碳驱动”背景下烟台市乡村三生空间碳中和路径研究[D]. 烟台:烟台大学, 2023. [LIU Jing. Carbon Neutrality Pathway Study in Yantai's Rural Three Life Spaces under the Background of “Double Carbon Drive”[D]. Yantai:Yantai University, 2023.]
- [15] 任悦. 河北省农村居民碳排放影响因素的实证研究[D]. 保定:河北农业大学, 2018. [REN Yue. The Empirical Study on the Influencing Factors of Carbon Emission of Rural Residents in Hebei Province[D]. Baoding:Hebei Agricultural University, 2018.]
- [16] XU Z Q, WU D F, CHEN S Y, *et al.* Research on the Carbon Emissions of the Urban Village: A Case Study of NanTing Village in Guangzhou College Town[C]//Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2017). [s. l.]:[s. n.], 2017.
- [17] YU Z J, QU G H, LI Z X, *et al.* Carbon Emission Composition and Carbon Reduction Potential of Coastal Villages under Low-Carbon Background[J]. Buildings, 2023, 13(12):2925.
- [18] WU Y Q, SUN Y, ZHOU C Y, *et al.* Spatial-Temporal Characteristics of Carbon Emissions in Mixed-Use Villages: A Sustainable Development Study of the Yangtze River Delta, China[J]. Sustainability, 2023, 15(20):15060.
- [19] 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 农户农业碳排放效率差异及多层次影响因素:以陕西省米脂县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(9):90-100. [ZHANG Jie, CHEN Hai, LIU Di, *et al.* Differences in Carbon Emission Efficiency of Farmers and its' multi-Level Influencing Factors—A Case of Mizhi County, Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(9):90-100.]
- [20] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J]. 农业经济问题, 2014, 35(7):18-26, 110. [ZHANG Guang-sheng, WANG Shan-shan. China's Agricultural Carbon Emission: Structure, Efficiency and Its Determinants[J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(7):18-26, 110.]
- [21] 张振. 考虑碳排放的县乡村三级物流网络选址与路径优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2022. [ZHANG Zhen. Research on the Location and Route Optimization of County and Village Logistics Networks Considering Carbon Emission[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2022.]
- [22] GOODFIELD D, ANDA M, HO G. Carbon Neutral Mine Site Accommodation Village: Developing the Model[C]. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12-16 December 2011. [s. l.]:[s. n.], 2011. DOI:10.36334/modsim.2011.hz.goodfield.
- [23] 袁静. 基于碳减排的山东地区绿色宜居农宅营建技术研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2022. [YUAN Jing. Research on Construction Technology of Green Livable Agricultural Housing in Shandong Based on Carbon Emission Reduction[D]. Jinan:Shandong Jianzhu University, 2022.]
- [24] 范理扬. 基于长三角地区的低碳乡村空间设计策略与评价方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017. [FAN Li-yang. Space Design Strategies and Evaluation Methods of Low Carbon Rural Area in Yangtze River Delta Region[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2017.]
- [25] 华虹, 王晓鸣, 彭文俊. 村庄低碳建设与碳排放评价[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(1):20-24. [HUA Hong, WANG Xiao-ming, PENG Wen-jun. Low-Carbon Construction and Carbon Emission Evaluation for Rural Village[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(1):20-24.]
- [26] HUANG Z S, LIU Y F, GAO J, *et al.* Approach for Village Carbon Emissions Index and Planning Strategies Generation Based on Two-Stage Optimization Models[J]. Land, 2022, 11(5):648.
- [27] 罗晓予. 基于碳排放核算的乡村低碳生态评价体系研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017. [LUO Xiao-yu. Study on Low-carbon Ecological Evaluation System of Villages Based on Carbon Emission

- Accounting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.]
- [28] 郑凯. 典型农村社区碳足迹计量方法研究:以浙江安吉可持续发展实验区为例[D]. 北京:中国农业科学院, 2014. [ZHENG Kai. The Carbon Footprint Measurement Method in Typical Rural Communities: A Case Studied by Anji China Stated Sustainable Development Community, Zhejiang Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.]
- [29] GB 50188—2007, 镇规划标准[S].
- [30] 祁巍锋, 唐彩飞. 工业型村庄碳排放影响因素研究:以杭州市萧山区凤凰村例[J]. 建筑与文化, 2016(4):155-157. [QI Wei-feng, TANG Cai-fei. Study on the Influencing Factors of Carbon Emission in Industrial Villages—A Case Study of Fenghuang Village, Xiaoshan City, Hangzhou[J]. Architecture & Culture, 2016(4):155-157.]
- [31] 王学渊, 苏子凡. “合村并居” 会减少县域碳排放吗?[J]. 浙江社会科学, 2022(3):20-33, 156-157. [WANG Xue-yuan, SU Zi-fan. Can “Village Merging” Reduce Carbon Emissions of County Level?[J]. Zhejiang Social Sciences, 2022(3):20-33, 156-157.]
- [32] 王帅, 赵荣钦, 杨青林, 等. 碳排放约束下的农业生产效率及其空间格局:基于河南省65个村庄的调查[J]. 自然资源学报, 2020, 35(9):2092-2104. [WANG Shuai, ZHAO Rong-qin, YANG Qing-lin, *et al.* Agricultural Production Efficiency and Spatial Pattern under Carbon Emission Constraint: Based on 65 Villages of Henan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(9):2092-2104.]
- [33] 刘敬杰, 夏敏, 刘友兆, 等. 基于多智能体与CA结合模型分析的农村土地利用变化驱动机制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6):242-252. [LIU Jing-jie, XIA Min, LIU You-zhao, *et al.* Driving Mechanism of Rural Land Use Change Based on Multi-Agent System and Cellular Automata[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6):242-252.]
- [34] 邓超. 农村土地利用变化分析:以三明梨树村为例[D]. 福州:福建农林大学, 2017. [DENG Chao. Analysis of Rural Land Use Change: A Case Study of Sanming Pear Village[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.]
- [35] 自然资源部. 自然资源部关于印发《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》的通知[S]. 自然资源通讯, 2023(22):11.
- [36] UNEP, UN-Habitat, Bank World. Draft International Standard for Determining Greenhouse Gas Emissions for Cities[S]. Kenya: UNEP, 2010.
- [37] 李子杰, 徐进亮, 王健, 等. 长江经济带城市碳排放及其影响因素的时空异质性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3):525-536. [LI Zi-jie, XU Jin-liang, WANG Jian, *et al.* Spatial and Temporal Heterogeneity of Urban Carbon Emissions and Their Influencing Factors in Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(3):525-536.]
- [38] 匡耀求, 欧阳婷萍, 邹毅, 等. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12):56-61. [KUANG Yao-qiu, OUYANG Ting-ping, ZOU Yi, *et al.* Present Situation of Carbon Source and Sink and Potential for Increase of Carbon Sink in Guangdong Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(12):56-61.]
- [39] 孙永乐. 西安市钢筋混凝土结构建筑生命周期碳平衡研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015. [SUN Yong-Le. A Study on Reinforced Concrete Structure Building Life Cycle Carbon Balance in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.]
- [40] 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. [GAI Zhao-xue, ZHAN Wen-xi, WANG Hong-yan, *et al.* Spatio-Temporal Differentiation Characteristics and Formation Mechanism of Carbon Emission from Cultivated Land Use Transformation[J]. Transactions of the Chinese Society for

Agricultural Machinery, 2022, 53(7):187-196.]

- [41] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京:南京大学, 2010. [LAI Li. Carbon Emission Effect of Land Use in China[D]. Nanjing:Nanjing University, 2010.]
- [42] 周思宇, 郝凤明, 尹岩, 等. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11):3865-3871. [ZHOU Si-yu, XI Feng-ming, YIN Yan, *et al.* Accounting and Drivers of Carbon Emission from Cultivated Land Utilization in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11):3865-3871.]
- [43] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8):1298-1309. [TIAN Yun, ZHANG Jun-biao. Regional Differentiation Research on Net Carbon Effect of Agricultural Production in China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8):1298-1309.]
- [44] 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 Jing-yun, HUANG Yao, ZHU Jiang-ling, *et al.* Carbon Budget of Forest Ecosystems and Its Driving Forces[J]. China Basic Science, 2015, 17(3):20-25.]

作者简介: 林莹 (1999—), 女, 籍贯为福建省三明市尤溪县, 研究方向为城乡土地利用与经济。E-mail: linyingcumt@163.com

(责任编辑: 李祥敏)

附录1 1990—2020年间江苏省各县区村庄用地变化碳效应

t

Appendix 1 Carbon effect calculation results of village land use changes in various counties and districts of Jiangsu Province from 1990 to 2020

县区	1990—1995年			1995—2000年			2000—2005年			2005—2010年			2010—2015年			2015-2020		
	流入碳效应	流出碳效应	流动碳效应	流入碳效应	流出碳效应	流动碳效应	流入碳效应	流出碳效应	流动碳效应	流入碳效应	流出碳效应	流动碳效应	流入碳效应	流出碳效应	流动碳效应	流入碳效应	流出碳效应	流动碳效应
南京市	50591.86	755.00	51346.85	221560.00	-3131.81	218428.20	28686.76	-6795.92	21890.84	-23458.50	1892459.00	1869000.00	100133.70	9491.38	109625.10	103178.90	1082.50	104261.40
无锡市区	151549.80	693.24	152243.10	29310.19	-528.07	28782.12	95289.28	13055.13	108344.40	-5947.81	1008014.00	1002066.00	15425.31	3604.92	19030.23	35380.43	-9.65	35370.78
江阴市	144417.50	1599.33	146016.80	12423.87	-291.57	12132.30	35694.99	-2562.65	33132.33	-154878.00	918855.80	763977.50	4819.28	-1365.56	3453.72	3994.76	0.00	3994.76
宜兴市	132606.00	-1775.51	130830.50	84318.62	-1052.21	83266.41	61525.77	2566.19	64091.96	-122210.00	433633.20	311423.10	29955.60	-6713.21	23242.38	10546.12	0.00	10546.12
徐州市区	58323.27	-757.32	57565.95	40306.04	-979.68	39326.36	624.34	-436.38	187.96	54738.84	463802.80	518541.70	25869.81	-10846.60	15023.22	27590.38	0.00	27590.38
丰县	3771.46	-419.88	3351.59	14992.61	-599.02	14393.59	465.06	-267.49	197.57	30545.29	59289.55	89834.84	18331.04	1435.71	19766.75	-4489.75	7963.21	3473.46
沛县	14463.39	-310.38	14153.02	40020.04	-494.14	39525.90	395.29	-325.54	69.75	32057.78	116310.90	148368.60	13789.18	-6001.34	7787.84	11085.56	0.00	11085.56
睢宁县	59420.20	1815.85	61236.05	10626.98	-559.72	10067.26	433.54	-244.79	188.75	14920.40	83130.95	98051.34	11695.57	-6350.15	5345.42	7217.13	-4.04	7213.09
新沂市	25197.96	-594.13	24603.83	9376.25	-370.51	9005.74	259.64	-124.70	134.94	50961.07	174234.40	225195.50	10615.70	-3388.45	7227.25	2826.24	0.00	2826.24
邳州市	45000.53	-557.11	44443.42	25144.29	-385.31	24758.99	308.52	-263.04	45.48	-6794.14	209215.80	202421.70	8511.78	-5920.48	2591.30	18860.39	-1.64	18858.76
常州市区	259638.00	-1296.33	258341.70	63861.35	-981.88	62879.47	77996.03	4670.46	82666.49	-180068.00	1218950.00	1038881.00	37109.69	21095.46	58205.16	41407.00	0.00	41407.00
溧阳市	50882.54	-485.73	50396.81	6585.25	-417.84	6167.41	19352.75	-963.21	18389.54	-83419.80	187149.80	103730.10	14412.76	13508.74	27921.51	10520.69	0.00	10520.69
苏州市区	79203.43	-1173.68	78029.75	105889.30	-1345.40	104543.90	92595.21	2998.49	95593.70	72386.80	1856273.00	1928659.00	51929.13	-5081.44	46847.69	28825.82	0.00	28825.82
常熟市	99103.51	-445.85	98657.65	20324.13	-287.27	20036.87	72717.03	251.00	72968.02	-188951.00	980631.20	791680.00	43563.97	-8763.50	34800.47	10613.85	0.00	10613.85
张家港市	80874.49	-574.07	80300.42	19637.26	-163.06	19474.20	52284.75	-596.68	51688.07	-91305.30	656384.20	565078.90	11983.46	-5.45	11978.01	8904.81	-1.85	8902.96
昆山市	30919.41	-199.06	30720.36	15860.22	-81.94	15778.29	37245.35	4633.35	41878.70	7035.12	764125.20	771160.30	13910.05	1654.62	15564.68	21866.55	0.00	21866.55
太仓市	33182.99	-124.44	33058.55	12472.85	-19.80	12453.04	19680.12	-179.95	19500.17	-113088.00	220158.60	107070.40	14881.69	-17542.90	-2661.24	-17360.60	0.00	-17360.60
南通市区	100038.00	-636.45	99401.60	11876.15	-387.65	11488.50	55216.46	-5359.53	49856.93	-129314.00	803216.30	673902.10	54649.14	8192.31	62841.45	34799.06	0.00	34799.06
如东县	33675.64	672.49	34348.13	2767.90	-120.34	2647.57	5740.18	-1862.24	3877.94	1893.12	-546.31	1346.81	35864.84	-5305.09	30559.75	14422.34	10662.05	25084.39
启东市	8447.80	-262.90	8184.91	6314.74	-213.10	6101.64	2299.98	-3491.21	-1191.23	20973.75	17854.17	38827.92	13605.98	-1269.48	12336.50	6810.75	5461.17	12271.92
如皋市	113578.00	-311.78	113266.20	21300.79	-240.11	21060.68	14159.07	-578.90	13580.18	41431.98	143900.50	185332.50	37989.03	91931.24	129920.30	4272.02	-14.97	4257.05
海安市	69494.79	-260.85	69233.94	4110.46	-196.38	3914.08	4032.50	-504.32	3528.18	49878.67	56658.09	106536.80	23048.66	-1268.88	21779.78	17823.05	0.00	17823.05
连云港市区	23443.10	-251.29	23191.80	3574.59	-248.29	3326.30	11844.44	-3571.12	8273.32	27019.11	102482.10	129501.20	7364.74	-3991.23	3373.52	1826.00	0.00	1826.00
东海县	13760.09	-298.55	13461.54	1344.32	-1304.44	39.88	290.95	-382.30	-91.35	10844.51	66655.42	77499.93	9621.75	-3113.18	6508.58	1112.90	0.00	1112.90
灌云县	1165.90	-113.19	1052.71	688.34	-133.38	554.96	996.64	-2517.71	-1521.08	15266.98	21185.98	36452.96	4263.94	-2513.26	1750.68	3549.16	0.00	3549.16
灌南县	1624.32	-114.32	1510.00	298.91	-83.30	215.60	299.67	-256.02	43.65	20594.78	87917.57	108512.40	3395.37	-1997.62	1397.75	1707.45	0.00	1707.45
淮安市区	18978.91	-1419.11	17559.80	4142.44	-981.34	3161.11	5808.58	671.23	6479.81	59799.71	589704.10	649503.80	22805.96	-4740.55	18065.42	10551.06	0.00	10551.06
涟水县	7443.05	-248.93	7194.12	1187.37	-302.44	884.94	553.01	-214.80	338.21	29810.59	113885.50	143696.00	6177.75	-3638.24	2539.51	1547.11	0.00	1547.11

盱眙县	1767.71	-285.23	1482.48	1681.55	-221.94	1459.62	153.30	-131.25	22.06	12729.14	72962.81	85691.95	5033.25	-2705.03	2328.22	330.16	-136.54	193.62
金湖县	6960.97	-340.18	6620.79	841.32	-202.22	639.10	131.97	-129.88	2.08	37786.65	20148.43	57935.08	4551.77	-2369.57	2182.21	301.65	0.00	301.65
盐城市区	9842.32	-273.16	9569.16	9443.43	-376.74	9066.69	17239.90	-2808.82	14431.08	59054.89	467492.30	526547.10	-185986.00	85959.75	-100026.00	35151.65	0.00	35151.65
响水县	6276.12	-376.62	5899.50	180.50	-288.78	-108.29	1376.72	-1209.91	166.81	26313.56	62540.69	88854.25	4194.22	-2524.85	1669.38	3725.52	-1.30	3724.22
滨海县	2968.12	-470.12	2498.00	195.27	-375.22	-179.96	5541.18	-8283.44	-2742.27	40613.30	18478.14	59091.43	-11389.90	-5535.66	-16925.50	4053.16	0.00	4053.16
阜宁县	5238.34	-563.73	4674.61	1088.01	-719.85	368.16	1370.95	-366.69	1004.25	51059.09	93069.75	144128.80	12857.97	-6934.84	5923.14	2784.82	0.00	2784.82
射阳县	6558.68	-170.55	6388.13	623.65	-184.30	439.35	18087.45	-6799.72	11287.73	53069.82	2386.33	55456.15	20605.78	7863.13	28468.91	2398.13	-1.58	2396.55
建湖县	6033.33	-279.01	5754.33	2960.29	-203.25	2757.04	931.03	-169.16	761.87	36243.82	26679.11	62922.93	13391.68	-6855.01	6536.67	3893.38	0.00	3893.38
东台市	8067.53	-351.61	7715.92	3798.24	-78.67	3719.57	3616.00	-3336.49	279.51	62089.13	31989.48	94078.61	30152.19	-2460.20	27691.99	11866.13	0.00	11866.13
扬州市区	244778.50	-1026.04	243752.40	5305.87	351.91	5657.77	20568.85	-290.74	20278.11	70819.39	229248.40	300067.80	41554.69	-6556.80	34997.89	21096.76	-1.92	21094.84
宝应县	14681.32	4528.02	19209.34	4001.07	-381.11	3619.96	2526.21	-511.32	2014.88	-24053.60	367295.50	343242.00	7267.02	-3708.13	3558.88	445.00	0.00	445.00
仪征市	2130.33	-18.30	2112.03	589.67	-207.82	381.85	286.78	-83.04	203.73	27843.14	37179.91	65023.05	11741.31	-4587.46	7153.86	7449.43	0.00	7449.43
高邮市	15571.70	-772.73	14798.97	3931.37	-482.10	3449.27	3424.25	-187.05	3237.20	16059.80	148436.30	164496.10	9187.07	-4644.84	4542.23	10865.05	0.00	10865.05
镇江市区	71560.75	-472.38	71088.37	23781.42	-311.12	23470.30	11028.53	-462.06	10566.47	9517.91	73720.19	83238.10	21849.22	-3068.40	18780.82	7091.57	0.00	7091.57
丹阳市	95373.22	-229.51	95143.71	5285.74	-266.16	5019.57	9972.13	85.92	10058.05	-56701.60	372230.30	315528.70	8215.05	-2047.91	6167.14	1638.64	0.00	1638.64
扬中市	56840.23	-144.87	56695.37	6713.52	-31.82	6681.70	1409.30	196.78	1606.08	5995.16	410868.70	416863.80	7028.22	120.99	7149.21	2392.20	-7.70	2384.51
句容市	25426.09	-185.30	25240.79	4307.51	-309.09	3998.42	326.47	-219.71	106.75	-27479.60	59330.80	31851.18	7044.67	-1611.26	5433.41	12303.61	0.00	12303.61
泰州市区	131057.60	-345.52	130712.10	5600.92	-143.98	5456.93	13088.34	805.68	13894.02	34340.82	171493.00	205833.80	33738.28	-128.89	33609.39	4579.99	0.00	4579.99
兴化市	10629.86	-324.57	10305.29	7007.93	-276.41	6731.52	5017.69	-280.34	4737.35	32145.82	398684.00	430829.80	8735.24	-2446.49	6288.75	929.95	0.00	929.95
靖江市	11463.22	-96.50	11366.71	1585.55	-37.22	1548.34	11109.62	-37.89	11071.72	-21923.50	192265.30	170341.70	8372.57	-153.95	8218.62	10863.32	0.00	10863.32
泰兴市	128371.30	-318.77	128052.50	7502.53	-187.24	7315.30	3572.02	-104.01	3468.01	24832.53	223265.90	248098.40	14613.53	40.07	14653.60	7752.94	0.00	7752.94
宿迁市区	56204.56	-662.60	55541.96	8350.71	-538.67	7812.04	1298.99	-325.12	973.87	103074.80	244362.80	347437.60	26826.25	-12231.00	14595.28	12498.24	-8.43	12489.81
沭阳县	46115.45	-961.16	45154.29	13258.17	-694.72	12563.45	1031.31	-330.39	700.92	64123.20	268513.40	332636.60	18230.79	-8533.30	9697.49	9164.65	0.00	9164.65
泗阳县	18547.54	-432.40	18115.15	4672.22	-386.90	4285.33	243.85	-201.83	42.02	46381.22	182458.40	228839.70	16290.66	-5925.32	10365.34	3027.14	0.00	3027.14
泗洪县	34901.55	-954.10	33947.44	3370.53	-706.79	2663.74	2687.90	-300.64	2387.26	35417.15	34977.45	70394.60	11744.28	-2330.04	9414.24	3235.10	-5.13	3229.98