

# 双碳背景下耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响 及其空间溢出效应 ——以黄淮海平原为例

王梦成<sup>1</sup>, 董又铭<sup>1</sup>, 林娜娜<sup>1</sup>, 漆信贤<sup>1</sup>, 黄贤金<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;

2. 自然资源部碳中和与国土空间优化重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 耕地利用转型为应对全球耕地利用碳减排提供了新途径。采用熵值法、空间自相关模型、空间计量模型等模型方法, 以黄淮海平原为例, 探究“双碳背景”下耕地利用转型对耕地利用碳排放的空间影响效应。结果发现: (1) 黄淮海平原耕地利用碳排放量、耕地利用转型及其具体形态均存在显著正向的空间自相关, 且耕地利用碳排放呈现“东高西低”“北高南低”的空间格局; (2) 显性转型加剧了本县域和邻近县域的碳排放, 而隐性转型则对本地和邻近地区均具有碳减排效应; (3) 数量转型、空间结构转型以及生产功能转型对耕地利用碳排放具有正向的直接效应和空间溢出效应; 生活功能转型和生态功能转型则均具有碳减排效应。研究表明, 应稳妥推进耕地适度规模化经营, 合理调整耕地空间分布格局, 发展现代化低碳农业; 因地制宜引导耕地利用转型; 利用比较优势, 充分发挥耕地利用隐性转型的区域耕地碳减排效应, 助力实现“双碳目标”。

**关键词:** 双碳目标; 耕地利用转型; 耕地利用碳排放; 空间计量模型; 空间溢出效应; 黄淮海平原

全球气候变暖严重威胁人类社会经济可持续发展, 其中耕地系统是重要的碳排放来源<sup>[1]</sup>。为了应对气候变化, 中国政府制定了“力争在 2030 年实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的目标。在这一背景下, 如何通过耕地低碳利用与转型探索碳中和路径已成为亟待解决的重要课题。因此, 探索耕地利用转型对耕地利用碳排放的作用机理和影响效应, 有助于耕地实现从碳源到碳汇的转变<sup>[2]</sup>, 为中国实现这一“双碳目标”提供新的途径。

土地利用转型的概念最早起源于 Grainger<sup>[3]</sup>和 Mather<sup>[4]</sup>的森林转型研究, 后来 Lambin 等<sup>[5]</sup>进一步探讨了土地利用转型的驱动力<sup>[6]</sup>。21 世纪初, Long 等<sup>[7]</sup>引入土地利用转型的概念, 并从显性形态 (Dominant morphology) 和隐性形态 (Recessive morphology) 两个维度进行描述。耕地利用转型与土地利用转型密切相关, 是土地利用转型研究的重要组成部分<sup>[8]</sup>。学术界围绕耕地利用转型的概念内涵<sup>[9]</sup>、理论模型<sup>[10]</sup>、测度方法<sup>[11]</sup>等展开了一系列研究。Ma 等<sup>[11]</sup>进一步将耕地利用转型的显性形态概括为数量转型和空间结构转型,

收稿日期: 2023-07-03; 修订日期: 2023-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42201301); 中国国土勘测规划院外协项目 (20231411037); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目 (BK20220037); 南京市规划和自然资源局高淳分局采购项目 (NJCC2022083)

作者简介: 王梦成 (1996-), 男, 湖北襄阳人, 博士研究生, 主要从事耕地利用与碳排放领域研究。

E-mail: mengchengwang@outlook.com

通讯作者: 黄贤金 (1968-), 男, 江苏扬中人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境经济研究。

E-mail: hxj369@nju.edu.cn

而隐性形态更多关注耕地质量、社会保障和生态价值等方面<sup>[6]</sup>,并基于此探究了耕地利用转型过程中的显性形态和隐性形态变化的时空格局<sup>[12]</sup>、驱动因素<sup>[13]</sup>,且关注到了其对经济<sup>[14]</sup>、乡村空间重构<sup>[15]</sup>、水环境质量<sup>[16]</sup>等的影响效应。基于这些研究,本文深入探究耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响效应,以期为实现中国的碳减排目标提供理论基础。尽管已有文献探讨了耕地利用转型的各个方面,但目前的研究主要基于截面数据评估其静态转型水平。因此,我们仍需要更多关于长时间序列的面板数据分析,以更加生动刻画其时空演进规律。此外,鲜有学者从显性和隐性转型的角度深入研究耕地利用转型的空间影响效应,这也是需要进一步研究的方向。

同时,由于耕地的空间邻近性<sup>[14]</sup>以及农机跨区作业<sup>[17]</sup>等因素,本区域的耕地利用行为可能对相邻区域的耕地利用产生外部性效应。Lesage等<sup>[18]</sup>将这种“外部性效应”定义为“空间溢出效应”,且已有学者研究发现耕地利用转型对农村经济增长<sup>[19]</sup>和农民收入水平<sup>[20]</sup>等方面具有显著的空间溢出效应。然而,在当前的“双碳背景”下,虽有研究探讨了耕地利用转型与碳排放的空间关联<sup>[21]</sup>,但尚未从空间角度定量评估耕地利用转型对耕地利用碳排放的直接影响和空间溢出效应。如果忽略了耕地利用转型的空间溢出效应,可能会导致评估结果产生偏误。因此,本文以黄淮海平原为例,采用空间计量方法来深入研究耕地利用转型及其具体形态对耕地利用碳排放的内在机理和空间影响效应,以期进一步细化耕地利用转型的价值内涵,助力实现中国“双碳目标”。

## 1 理论机理分析

耕地作为粮食生产和绿色发展的主要承载者,耕地利用转型是破解“农业、农村、农民”等现实问题、促进农村经济可持续发展的有效途径<sup>[22]</sup>。为进一步刻画耕地利用转型,本文将其细分为耕地利用显性转型(Dominant Farmland Use Transition, DFUT)和隐性转型(Recessive Farmland Use Transition, RFUT)<sup>[23]</sup>,并从DFUT和RFUT两个层面来分析耕地利用转型对耕地利用碳排放影响的直接效应与空间溢出效应。

### 1.1 耕地利用转型对耕地利用碳排放影响的直接效应

DFUT主要衡量了耕地利用的数量及空间结构转变<sup>[7]</sup>,它通过增加有效耕地面积和优化耕地空间布局等途径来直接影响耕地利用碳排放。通常情况下,耕地面积的变化伴随着耕地与其他用地类型的相互转化<sup>[23]</sup>,如果耕地转化为建设用地,这将导致大量的碳排放。然而,如果退耕还林还草,则可充当碳汇并吸收碳排放<sup>[24]</sup>。从空间角度来看,土地综合整治是优化耕地空间分布格局的有效途径<sup>[25]</sup>,这不仅有助于增加耕地的数量,还可以促进耕地的集约利用,形成空间集聚效应,进而通过存量挖潜提高耕地利用效率来减少耕地利用碳排放。然而,需要注意的是,大规模农业机械化可能会导致土壤中有有机碳通过耕作实践排放到大气中,造成碳排放量的增加<sup>[26]</sup>。

RFUT是耕地利用转型的另一个重要方面<sup>[21]</sup>,包括耕地产出能力、耕地质量和经营方式等多方面属性<sup>[7]</sup>。RFUT通过改善耕地的投入产出能力、提高耕地的质量以及优化经营方式等途径<sup>[14]</sup>来直接影响耕地利用碳排放。良好的投入产出能力是耕地利用的核心,通过合理配置生产要素能够有效提高耕地利用效率和粮食产量。然而,这也可能导致碳排放的增加<sup>[23]</sup>;通过土壤改良、轮作休耕、合理灌溉以及减少农药和化肥使用量等方法<sup>[27]</sup>,

农户可以改良耕地质量,增强其碳汇能力,从而减少碳排放。同时,优化经营方式,例如调整种植结构、采用创新农业技术、减少掠夺式经营等方式,也有助于减少耕地利用碳排放。

## 1.2 耕地利用转型对耕地利用碳排放影响的空间溢出效应

根据已有研究<sup>[14,20]</sup>,*DFUT*和*RFUT*主要通过示范效应、要素流动、集聚共享等路径影响相邻地区的耕地利用碳排放(图1)。

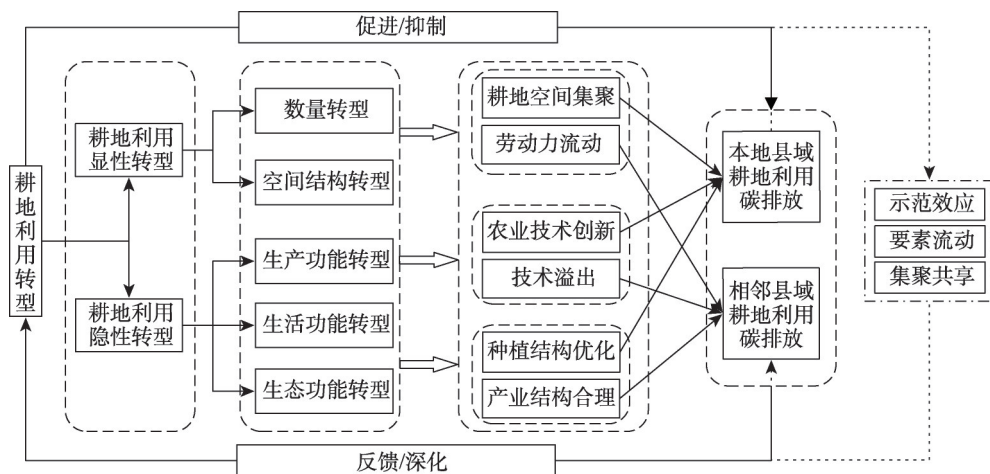


图1 耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响机理

Fig. 1 Impact mechanism of *FUT* on farmland use carbon emissions

(1) 示范效应。*DFUT*通过示范效应在相邻地区产生空间溢出效应。*DFUT*通过增加耕地数量,实现耕地的集约化利用和规模化经营,从而有效增加产出,但同时也会增加耕地利用碳排放。相邻地区可能受政府政策启发<sup>[20]</sup>,模仿学习其耕地规模化利用等农业政策,形成示范效应,使得相邻地区农业产量的增加也伴随着碳排放量的增加,从而形成空间溢出效应。

(2) 要素流动。*RFUT*通过要素流动实现对耕地利用碳排放的空间溢出效应。一是劳动力流动。随着交通基础设施和农业机械化的完善,耕地规模化经营会促进农业劳动力跨区流动和农业机械跨区服务<sup>[17]</sup>,规模化经营提高了耕地利用效率,但也增加了对邻近地区交通基础设施和能源供给的需求,从而形成对相邻地区的空间溢出效应<sup>[28]</sup>。二是资本要素流动。根据边际效应递减规律,当本地区资本投入所带来的投资回报逐渐饱和时,资本将流向相邻地区,资本投入的增加有利于促进相邻地区的产业化发展和城镇化进程,进而导致更多的碳排放。

(3) 集聚共享。*RFUT*会促进耕地基于地理位置的空间集聚,从而形成农业集聚区。在这些区域内,交通、电力、灌溉等各种基础设施具有一定的共享属性<sup>[20]</sup>,可以形成区域协同发展格局。因此,通过集聚效应,本地区的*RFUT*能够对相邻地区的耕地利用碳排放产生空间影响效应。与此同时,由于耕地利用的空间集聚,本地区在耕地利用过程中使用的农药和化肥等所产生的碳排放也可能通过大气环流等方式传播到邻近地区<sup>[29]</sup>,从而增加相邻地区的耕地利用碳排放。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究区概况

黄淮海平原(32°N~41°N, 113°E~122°E)地处中国华北地区,包括北京、天津、河北、山东、河南的大部分地区,以及江苏和安徽的北部(图2)。截至2020年,黄淮海平原的耕地面积约为29.22万 $\text{km}^2$ <sup>[30]</sup>,占据了黄淮海平原总面积的约70.08%。黄淮海平原整体地势平坦,平均海拔约为50 m,被视为中国最大的农副产品生产基地,以其广阔的耕地面积和高产的粮食产量而闻名<sup>[31]</sup>。

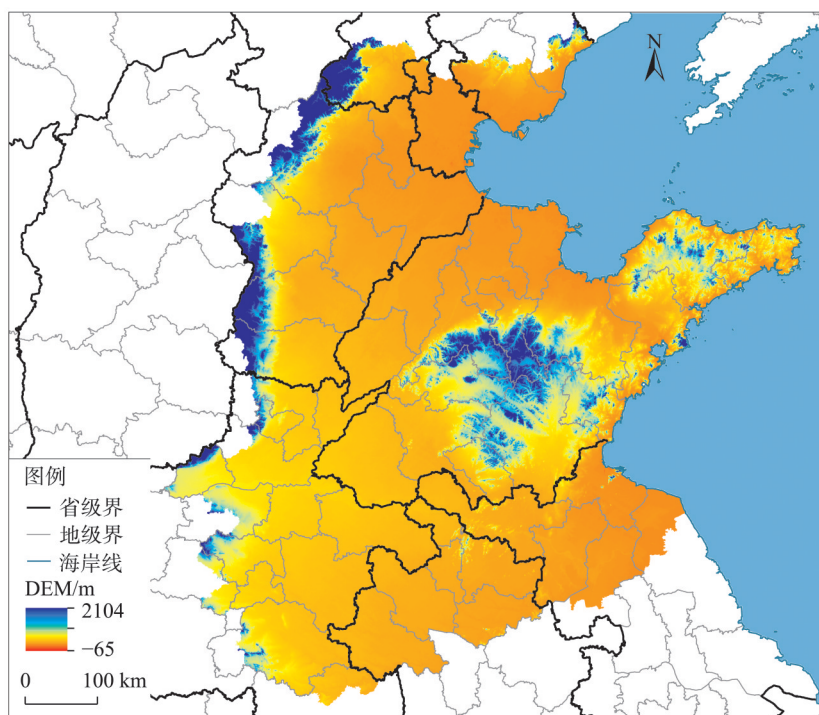


图2 研究区域

Fig. 2 Study area

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 熵值法

较多学者在确定指标权重时采用AHP法、德尔斐法等赋权方法,但这些方法具有较大的主观性。为了提高评估结果的科学可靠性,本文选择采用面板熵值法来测度耕地利用转型及其各具体形态的指数,这一方法具有较高的可信度和精确度。关于熵值法的具体应用方法,可参考已有的文献<sup>[32]</sup>,因此不再赘述。

#### 2.2.2 空间计量模型

在采用空间计量模型计算耕地利用转型对耕地利用碳排放的空间影响效应前,需考察两者是否具有空间关联性<sup>[33]</sup>。本文采用全局Moran's  $I$ 指数来衡量耕地利用碳排放与耕地利用转型的空间自相关性,计算公式如下:



$$\text{Moran's } I_{\text{全局}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}}, \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (1)$$

式中： $x_i$ 、 $x_j$ 分别表示县域*i*、县域*j*的耕地利用碳排放或耕地利用转型水平，且*i*≠*j*；*n*为样本县域数量（个）； $\bar{x}$ 表示所有县域耕地利用碳排放或耕地利用转型的均值； $W_{ij}$ 为空间权重矩阵，本文采用二进制邻接权重矩阵，即当县域*i*与县域*j*相邻时取值为1，若不相邻则取值为0； $\sigma^2$ 表示其方差。若Moran's *I*>0，则表示黄淮海平原耕地利用碳排放或耕地利用转型具有空间正相关性，反之则为空间负相关性；若Moran's *I*=0，则表示无空间相关性。

### (3) 空间计量模型构建

从空间计量角度来看，耕地利用转型不仅对本县域的耕地利用碳排放产生影响，对邻近县域也可能产生影响<sup>[18]</sup>。如果忽略耕地利用转型的空间溢出效应，则可能会低估其碳排放效应<sup>[34]</sup>。鉴于此，本文以DFUT和RFUT作为解释变量，构建空间滞后模型、空间误差模型和空间Durbin模型来刻画耕地利用转型的空间效应，模型如下：

$$FUCE_{it} = \alpha + \theta \times DFUT_{it} + \tau \times RFUT_{it} + \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times DFUT_{it} + \zeta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times RFUT_{it} + \beta_i X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$FUCE_{it} = \alpha + \beta_i X_{it} + \lambda W_{ij} \mu_{it} + \theta \times DFUT_{it} + \tau \times RFUT_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$FUCE_{it} = \alpha + \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} \times FUCE_{it} + \theta \times DFUT_{it} + \tau \times RFUT_{it} + \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times DFUT_{it} + \zeta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times RFUT_{it} + \beta_i X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中：*FUCE*表示耕地利用碳排放（Farmland Use Carbon Emission）水平（10<sup>4</sup> t）；*X*表示控制变量，本文控制以下变量：人均GDP（lnPGDP），以GDP与年末总人口之比的对数来衡量<sup>[23]</sup>；产业结构（IS），以第二产业、第三产业产值增加值所占GDP的比例来衡量<sup>[35]</sup>；地均城市固定资产投资（lnINVEST），以城市固定资产投资额与城市建设用地面积之比的对数来衡量<sup>[21]</sup>； $\rho$ 为被解释变量空间滞后项*W*×*FUCE*的回归系数； $\theta$ 、 $\tau$ 、 $\delta$ 、 $\zeta$ 分别为DFUT、RFUT及其空间滞后项的回归系数； $\varepsilon_{it}$ 为随机扰动项； $\mu_{it}$ 表示个体效应； $\alpha$ 为常数项； $\beta$ 、 $\lambda$ 分别为控制变量、个体效应的回归系数。

为进一步探究耕地利用显性转型和隐性转型的各具体形态对耕地利用碳排放的空间影响效应，本文构建空间滞后模型、空间误差模型和空间Durbin模型来刻画耕地利用转型的空间效应，模型构建如下：

$$FUCE_{it} = \alpha + \theta \times EDFUT_{it} + \tau \times ERFUT_{it} + \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times EDFUT_{it} + \zeta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times ERFUT_{it} + \beta_i X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$FUCE_{it} = \alpha + \beta_i X_{it} + \lambda W_{ij} \mu_{it} + \theta \times EDFUT_{it} + \tau \times ERFUT_{it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$FUCE_{it} = \alpha + \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} \times FUCE_{it} + \theta \times EDFUT_{it} + \tau \times ERFUT_{it} + \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times EDFUT_{it} + \zeta \sum_{j=1}^n W_{ij} \times ERFUT_{it} + \beta_i X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中： $EDFUT$ 、 $ERFUT$ 分别表示耕地利用显性转型、隐性转型的各具体形态。

然而，Lesage等<sup>[18]</sup>指出解释变量空间滞后项的系数并不能表示真实的偏回归系数，需要进一步将空间模型的总效应进行分解。本文进一步采用Lesage等<sup>[18]</sup>提出的偏微分方法计算耕地利用转型对耕地利用碳排放的总效应、直接效应和空间溢出效应，公式为：

$$\bar{M}(r)_{\text{总效应}} = n^{-1} I_n S_r(W)_{ij} \quad (8)$$

$$\bar{M}(r)_{\text{直接效应}} = n^{-1} \sum_{n=1}^n \sum_{n=1}^n S_r(W)_{nn} \quad (9)$$

$$\bar{M}(r)_{\text{间接效应}} = \bar{M}(r)_{\text{总效应}} - \bar{M}(r)_{\text{直接效应}} \quad (10)$$

式中： $I_n$ 为 $n$ 阶单位矩阵； $S_r(W)_{ij}$ 表示县域 $j$ 的第 $r$ 个解释变量 $x_{jr}$ 对县域 $i$ 被解释变量耕地利用碳排放的影响； $S_r(W)_{nn}$ 表示县域 $i$ 的第 $r$ 个解释变量 $x_{ir}$ 对本地区被解释变量耕地利用碳排放的影响。

## 2.3 变量选取与数据说明

### 2.3.1 耕地利用碳排放测度

耕地利用碳排放是指在利用耕地进行农业生产活动中直接或间接产生的大量温室气体<sup>[36,37]</sup>。当前对耕地利用碳排放量的测度普遍采用IPCC<sup>[38]</sup>提出的碳排放系数法，因其技术简单、便于地区间对比而在全国<sup>[39]</sup>、省级<sup>[40]</sup>、城市群<sup>[41]</sup>等尺度得到了广泛的应用。结合已有研究，本文主要关注以下几类活动产生的碳排放，包括：（1）农作物种植，如翻耕行为产生的碳排放；（2）农业机械，如农机运转时消耗的能源在其生产和使用过程中产生的碳排放；（3）化肥、农药等化工产品施用以及农膜使用所产生的碳排放；（4）农业灌溉过程中产生的碳排放。本文构建如下所示的耕地利用碳排放测算公式：

$$FUCE = CE_g + CE_e + CE_f + CE_p + CE_m + CE_i \quad (11)$$

式中： $CE_g$ 、 $CE_e$ 、 $CE_f$ 、 $CE_p$ 、 $CE_m$ 和 $CE_i$ 分别为耕地利用过程中翻耕、农机、化肥、农药、农膜和灌溉等6种主要碳源。不同碳源的碳排放系数如表1所示。

表1 耕地利用主要碳源的碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficients of the main carbon sources in farmland use

碳源	碳排放系数	数据来源
翻耕	3.126 kg/hm <sup>2</sup>	伍芬琳等 <sup>[42]</sup>
农机	0.180 kg/kW	West等 <sup>[43]</sup>
化肥	0.896 kg/kg	West等 <sup>[43]</sup>
农药	4.934 kg/kg	Post等 <sup>[44]</sup>
农膜	5.180 kg/kg	李波等 <sup>[45]</sup>
灌溉	20.500 kg/hm <sup>2</sup>	李波等 <sup>[45]</sup>

### 2.3.2 耕地利用转型测度

本文构建了一个耕地利用转型测度指标体系，涵盖了 $DFUT$ 和 $RFUT$ 两个方面（表2）。根据前文的理论分析和内涵阐释，对于 $DFUT$ ，采用耕地利用数量转型（Quantitative Farmland Use Transition, QFUT）和空间

结构转型（Spatial Structure Farmland Use Transition, SSFUT）来表征耕地利用转型。为了排除各县域人口和经济发展差异的影响，采用人均耕地面积<sup>[46]</sup>、人均农作物播种面积<sup>[47]</sup>、土地垦殖率<sup>[46]</sup>以及新增耕地面积<sup>[11]</sup>等指标来表示耕地利用数量转型，同时，采用耕地复种指数<sup>[48,49]</sup>和粮食作物播种面积占比<sup>[19,46]</sup>来表示耕地利用空间结构转型。

对于 $RFUT$ ，已有学者<sup>[50]</sup>从土地利用的经济、社会、生态和环境等四个维度构建了 $RFUT$ 指标体系。Ma等<sup>[11]</sup>根据耕地利用的功能形态测度了 $RFUT$ ，并将其细分为生产功能转型（Production Function Farmland Use Transition, PFFUT）、生活功能转型（Living

Function Farmland Use Transition, LFFUT) 和生态功能转型 (Ecological Function Farmland Use Transition, EFFUT)。本文之所以采用功能形态表征  $RFUT$ , 是因为不同环境条件和资源禀赋的区县为耕地利用转型提供了不同的发展路径与政策支持, 这能够有效地推动耕地利用的多功能和多维度转型。耕地的功能形态可以综合反映耕地的投入产出、耕地质量和经营方式<sup>[51,52]</sup>。具体来看, 本文以地均粮食产量<sup>[46]</sup>、人均农作物播种面积<sup>[47]</sup>、人均农林牧渔产值<sup>[47]</sup>以及地均农业机械总动力<sup>[11]</sup>来表征  $PFFUT$ ; 以地均乡村人口<sup>[46]</sup>、人均粮食保障率<sup>[49]</sup>、农民人均收入<sup>[14]</sup>、农业从业人员占比<sup>[46]</sup>来表征  $LFFUT$ ; 以耕地生态系统服务文化价值<sup>[19]</sup>和人均耕地生态承载力<sup>[49]</sup>来衡量  $EFFUT$ 。具体的指标定义与计算方法见表2。

表2 耕地利用转型指标体系  
Table 2 Evaluation index system of  $FUT$

决策层	目标层	准则层	指标层	指标定义	指标意义
耕地利用 显性转型	数量转型	耕地利用	人均耕地面积	常用耕地面积/年末总人口/(hm <sup>2</sup> /人)	耕地数量变化
			人均农作物 播种面积	农作物播种面积/年末总人口/(亩/人) (1亩≈667 m <sup>2</sup> )	农作物面积变化
			土地垦殖率	常用耕地面积/土地总面积/%	土地利用率
		空间结构 转型	新增耕地面积	$T_2-T_1/\text{hm}^2$ <sup>(1)</sup>	耕地扩张水平
			复种指数	农作物总播种面积/常用耕地面积/%	耕地利用程度
	耕地利用 隐性转型	生产功能 转型	粮食作物 播种面积占比	粮食作物播种面积/常用耕地面积/%	耕地种植结构
			地均粮食产量	粮食总产量/常用耕地面积/(t/hm <sup>2</sup> )	耕地粮食生产能力
			人均农业产值	农业产值增加值/农业从业人员 (元/人)	耕地产出价值
		生活功能 转型	地均农业 机械使用	农业机械总动力/常用耕地面积 (kW/hm <sup>2</sup> )	耕地利用投入水平
			地均乡村人口	乡村人口/常用耕地面积/(人/hm <sup>2</sup> )	耕地供养能力
生态功能 转型	人均粮食保障率		粮食总产量/(常住人口×400 kg)	耕地粮食保障能力	
	收入贡献率	种植业收入/农村居民纯收入/%	耕地经济生活保障能力		
	农业从业人员占比	农业从业人员/乡村人口/%	耕地就业保障能力		
	耕地生态系统服务 文化价值	耕地面积×耕地生态系统服务文化价值 当量因子	耕地生态功能文化服务能力		
		人均耕地生态 承载力	人均耕地面积×耕地均衡因子×耕地产 量因子 <sup>(2)</sup>	耕地生态功能承载能力	

注: (1)  $T_1$ 表示前一期耕地面积 ( $\text{hm}^2$ ),  $T_2$ 表示当期耕地面积 ( $\text{hm}^2$ )。 (2) 耕地均衡因子设置为1, 耕地产量因子=各县(市)粮食单产/全国粮食单产。

2.3.3 数据说明

本文所采用的县级统计数据来源于2001—2021年的《中国县(市)社会经济统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》以及各市县的统计年鉴。为保证数据的连续性和完整性, 本文将地级市的市辖区和县级市均视为县级行政单位。考虑到一些市辖区的数据并未单独统计, 导致缺失值较多, 本文将这些区域视为样本未覆盖区, 最终获取到2000—2020年305个样本区数据。需要注意的是, 由于一些数据在不同时间段的统计口径不同, 本文在原始数据的基础上通过计算平均增长率予以补齐, 并以相关指标进行了校正。同时,

为了减少价格变动的影响，以2000年为基期对所有价格采用GDP平减指数折算为不变价。表3为各个变量的描述性统计结果。

表3 主要变量描述性统计  
Table 3 Descriptive statistics of main variables

变量	指标	符号	观察值/个	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	耕地利用碳排放	<i>FUCE</i>	6405	3.724	2.440	0.015	39.739
核心解释变量	耕地利用显性转型	<i>DFUT</i>	6405	0.220	0.096	0.001	0.852
	数量结构转型	<i>QFUT</i>	6405	0.391	0.119	0.007	0.927
	空间结构转型	<i>SSFUT</i>	6405	0.146	0.104	0.001	0.995
	耕地利用隐性转型	<i>RFUT</i>	6405	0.169	0.051	0.050	0.745
	生产功能转型	<i>PFFUT</i>	6405	0.172	0.105	0.018	0.853
	生活功能转型	<i>LFFUT</i>	6405	0.137	0.070	0.031	0.854
	生态功能转型	<i>EFFUT</i>	6405	0.334	0.129	0.002	0.836
控制变量	人均GDP	<i>lnPGDP</i>	6405	9.471	0.772	7.270	12.233
	产业结构	<i>IS</i>	6405	0.797	0.113	0.282	0.999
	地均固定资产投资	<i>lnINVEST</i>	6405	5.647	1.817	-6.062	9.936

3 结果分析

3.1 耕地利用转型与耕地利用碳排放演变特征

图3报告了2000—2020年间黄淮海平原305个县域的耕地利用转型、显性转型和隐性转型的年均值变化趋势。在研究期间，耕地利用转型呈现出先快速增长，然后震荡减小的趋势。其中，耕地利用显性转型水平明显高于隐性转型水平。2000—2011年，受惠农政策的实施和新兴技术的广泛应用影响，耕地利用隐性转型迅速发展，呈现增长态

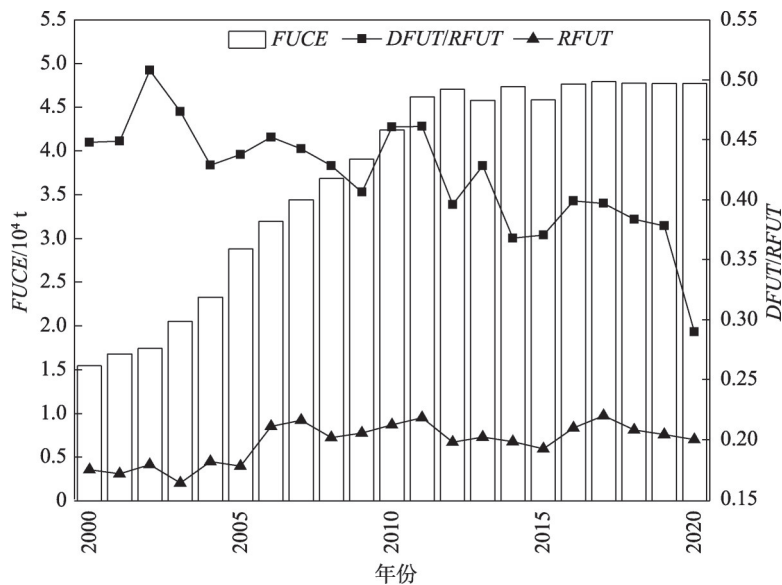


图3 2000—2020年黄淮海平原耕地利用转型与碳排放时间演变

Fig. 3 Temporal evolution of FUCE and FUTURE in Huang-Huai-Hai Plain from 2000 to 2020



势,而显性转型则经历了震荡减小的过程<sup>[46]</sup>;在2012—2020年间,耕地利用转型进入相对稳定阶段,显性转型和隐性转型总体上趋于稳定,表现出耕地利用与地区资源禀赋相适应的特点<sup>[8]</sup>。

与耕地利用转型的这两个阶段变化趋势相一致的是,2000—2011年间,耕地利用碳排放量持续增长;而在2012—2020年间,碳排放的年增长率有所下降,表现出收敛趋势,说明中国自2010年开始实施的系列绿色低碳政策<sup>[53]</sup>已有成效,碳排放量得到了一定控制。

图4可视化展示了黄淮海平原的耕地利用碳排放的空间分布格局。总体上,2000—2020年,耕地利用碳排放量不断增加,并且显示出收敛的趋势,这与图3的结论一致。就空间分布而言,碳排放量较高的县域主要集中在北京、天津和山东等环渤海地区,而河南、河北等地区的县域碳排放量相对较低,到了2020年,黄淮海平原的耕地利用碳排放的空间分布格局基本呈现出“东高西低”“北高南低”的特征。

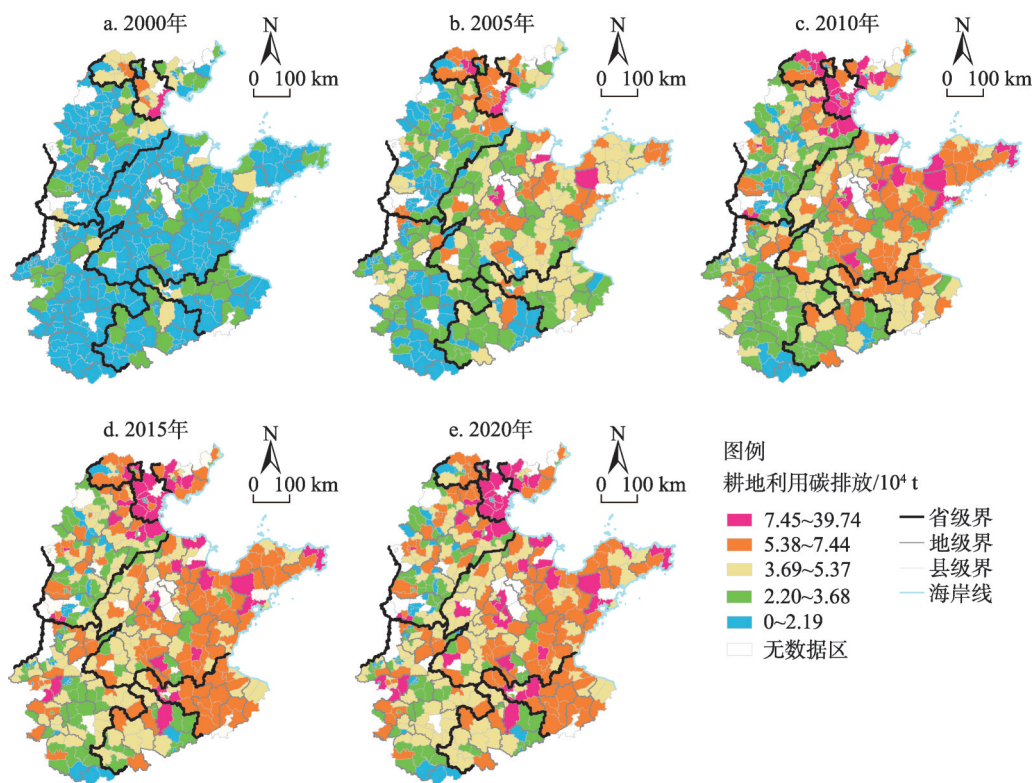


图4 2000—2020年黄淮海平原耕地利用碳排放空间分布格局

Fig. 4 Spatial patterns of farmland use carbon emission in Huang-Huai-Hai Plain from 2000 to 2020

### 3.2 空间自相关分析

空间自相关性是进行空间计量分析的基础和前提<sup>[34]</sup>。本文利用全局Moran's  $I$ 指数分析了黄淮海平原耕地利用转型与耕地利用碳排放的空间自相关性。由表4可知,2000—2020年所有变量的全局Moran's  $I$ 指数均为正值,且通过1%显著性水平检验,这表明黄淮海平原的耕地利用碳排放和耕地利用转型水平相似的县域之间具有空间依赖性,相邻

表4 耕地利用碳排放与耕地利用转型及各具体形态的全局Moran's I指数

Table 4 Global Moran's I index of *FUCE*, *FUT*, and its specific forms

变量	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
<i>FUCE</i>	0.542***	0.553***	0.545***	0.534***	0.522***
<i>FUT</i>	0.262***	0.365***	0.363***	0.307***	0.451***
<i>DFUT</i>	0.594***	0.606***	0.584***	0.577***	0.586***
<i>QFUTT</i>	0.571***	0.620***	0.554***	0.553***	0.523***
<i>SSFUT</i>	0.431***	0.488***	0.540***	0.411***	0.534***
<i>RFUT</i>	0.272***	0.421***	0.418***	0.339***	0.470***
<i>PFFUT</i>	0.195***	0.343***	0.390***	0.345***	0.295***
<i>LFFUT</i>	0.667***	0.644***	0.608***	0.495***	0.516***
<i>EFFUT</i>	0.563***	0.585***	0.575***	0.606***	0.628***

注：\*\*\*表示显著性水平为1%，下同。

县域之间显示出显著的空间相似性，因此可以采用空间计量模型来分析耕地利用转型对耕地利用碳排放的空间影响效应。

为进一步探究耕地利用转型对耕地利用碳排放的空间关联性差异，本文使用了Moran's I散点图来分析耕地利用碳排放、耕地利用转型的局部空间集聚特征。以2010年为例，本文绘制了耕地利用碳排放、耕地利用转型、显性转型以及隐性转型的Moran's I散点图。如图5所示，这四个变量主要分布在第一和第三象限，呈现出显著的“高一高”和“低—低”局部空间集聚特征。这与上文的初步观察结果相一致，表明耕地利用转型对耕地利用碳排放可能存在空间溢出效应。

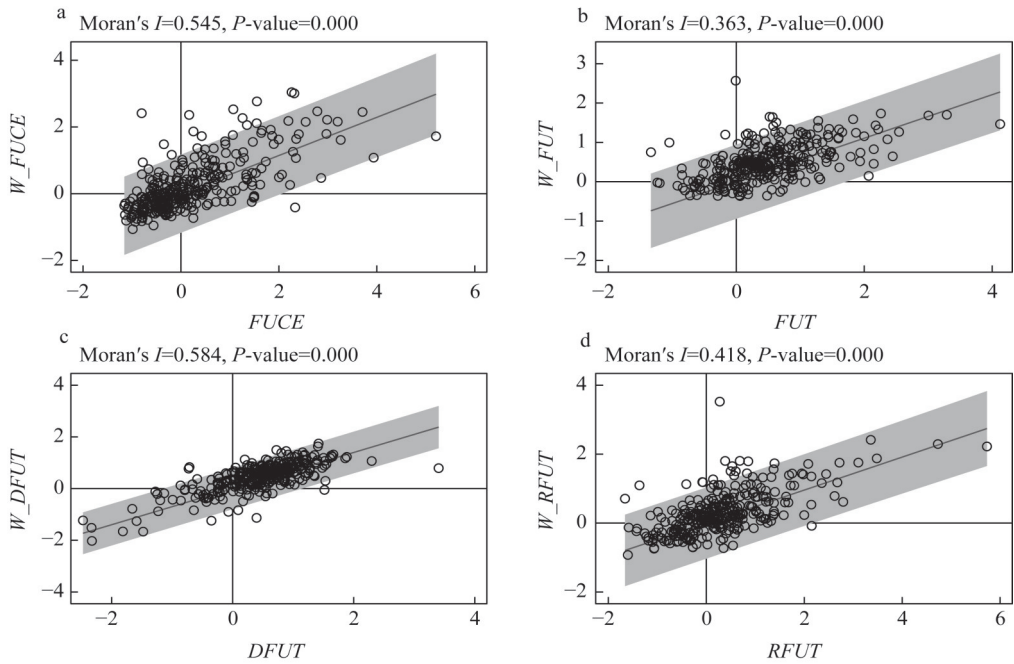


图5 2010年耕地利用碳排放、耕地利用转型、耕地利用显性转型和隐性转型Moran's I散点图  
Fig. 5 The Moran's I scatter plot of *FUCE*, *FUT*, *DFUT*, and *RFUT* in 2010

3.3 空间计量模型设定与检验

为了选择适当的空间计量模型来探究耕地利用转型与耕地利用碳排放之间的空间影响效应，本文进行了一系列模型遴选检验，检验结果如表5所示。当采用传统LM和稳健LM检验时，四种模型在两种情况下均通过了1%水平的显著性检验，表明可以选择空间误差模型和空间滞后模型。同时，豪斯曼检验结果拒绝了随机效应的原假设。为确保估计结果的稳健性，本文首先采用了更一般的时空双固定的空间Durbin模型，然后根据El-horst<sup>[54]</sup>的判定方法，使用Wald和LR检验来判定是否拒绝空间Durbin模型退化为空间滞后模型或空间误差模型的原假设。表5的结果显示，Wald和LR检验在1%水平下拒绝了原假设，表明采用空间Durbin模型是合理的。

表5 无空间交互效应的面板数据模型LM检验结果  
Table 5 Test results of panel data model with no spatial interaction effect

检验	未考虑转型具体形态				考虑转型具体形态			
	OLS	时间固定	空间固定	时空双固定	OLS	时间固定	空间固定	时空双固定
LM spatial lag	151.214***	178.241***	74.568***	159.981***	148.918***	114.119***	119.331***	189.899***
Robust LM spatial lag	191.521***	11.487***	1.643	0.073	127.259***	11.846***	2.482	0.432***
LM spatial error	190.838***	175.426***	320.387***	322.164***	242.688***	205.877***	289.948***	275.659***
Robust LM spatial error	581.145***	158.673***	313.462***	306.247***	106.029***	195.603***	278.099***	256.192***
Wald test spatial lag			22.26***				128.89***	
LR test spatial lag			147.18***				358.83***	
Wald test spatial error			48.64***				64.34***	
LR test spatial error			999.15***				958.00**	
Hausman			67.25***				93.23***	

注：“\*”表示显著性水平为5%，下同。

本文使用Matlab 2017b软件进行空间Durbin模型的估计测算，估计结果如表6中模型（4）和模型（8）所示。为了对比，表6同时给出了OLS模型、空间滞后模型和空间误差模型的回归结果。从adj  $R^2$ 、 $\sigma^2$ 和Log-L等统计量来看，空间Durbin模型的拟合优度较为理想，表明本文采用空间Durbin模型能够较好地反映黄淮海平原耕地利用转型对耕地利用碳排放影响效应的实际情况。同时，不管是否考虑转型具体形态，被解释变量的空间滞后项（ $W \times FUCE$ ）在模型（1）~模型（8）中均在1%水平上显著为正，且数值均在0.599以上，说明县域间的耕地利用碳排放存在显著正向的空间溢出效应。当不考虑转型具体形态时，模型（4）中 $RFUT$ 的系数为-1.309且显著，这表明 $RFUT$ 能够有效减少耕地利用碳排放；而 $DFUT$ 的系数虽为正但并不显著，说明仅通过 $DFUT$ 和 $RFUT$ 两个维度难以揭示阐述耕地利用转型对耕地利用碳排放影响的内在机理。

因此，本文进一步引入了 $DFUT$ 和 $RFUT$ 的具体形态，以探究耕地利用显性和隐性转型对耕地利用碳排放的空间影响。模型（5）~模型（8）相较于模型（1）~模型（4）在拟合优度上均有显著提高，且 $DFUT$ 和 $RFUT$ 的具体形态对耕地利用碳排放的影响效应更为直观与清晰。与原始模型（5）相比，空间Durbin模型[模型（8）]中，耕地利用转型各具体形态的回归系数更小，这说明如果不考虑耕地利用转型的空间溢出效应，将会导致耕地利用转型的耕地利用碳减排效应估计产生偏误<sup>[18,54]</sup>。

表6 空间Durbin模型估计结果

Table 6 The results of SDM

变量	未考虑转型具体形态				考虑转型具体形态			
	(1) OLS	(2) SAR	(3) SEM	(4) SDM	(5) OLS	(6) SAR	(7) SEM	(8) SDM
<i>DFUT</i>	-0.842*** (-5.01)	0.045 (0.24)	0.159 (0.74)	0.026 (0.12)				
<i>RFUT</i>	3.227*** (6.04)	-1.362*** (-3.83)	-1.439*** (-3.59)	-1.309** (-3.27)				
<i>QFUT</i>					-7.209*** (-30.46)	0.760** (3.16)	0.993*** (3.71)	0.913*** (3.40)
<i>SSFUT</i>					1.548*** (7.60)	0.375* (2.51)	0.458** (2.82)	0.402* (2.48)
<i>PFFUT</i>					2.808*** (11.31)	0.544*** (3.95)	0.299* (1.99)	0.259 (1.74)
<i>LFFUT</i>					-4.181*** (-13.19)	-2.675*** (-8.16)	-2.464*** (-6.26)	-2.009*** (-5.05)
<i>EFFUT</i>					7.340*** (36.86)	-2.621*** (-9.72)	-3.652*** (-11.99)	-3.428*** (-11.28)
<i>_cons</i>	-13.79*** (-36.89)				-14.72*** (-39.05)			
<i>W×FUCE</i>		0.643*** (64.12)		0.635*** (62.14)		0.617*** (59.04)		0.599*** (54.58)
<i>W×空间误差项</i>			0.651*** (64.68)				0.641*** (61.29)	
<i>Sigma<sup>2</sup></i>		0.312*** (54.86)	0.313*** (54.76)	0.308*** (54.85)		0.305*** (54.97)	0.304*** (54.73)	0.299*** (54.97)
<i>W×DFUT</i>				1.282*** (4.31)				
<i>W×RFUT</i>				-2.214*** (-3.37)				
<i>W×QFUT</i>								-0.557 (-1.34)
<i>W×SSFUT</i>								-0.355 (-1.39)
<i>W×PFFUT</i>								1.350*** (5.36)
<i>W×LFFUT</i>								-3.121*** (-5.19)
<i>W×EFFUT</i>								3.457*** (7.38)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
<i>N/个</i>	6405	6405	6405	6405	6405	6405	6405	6405
Log-L		-5736.993	-5757.848	-5680.561		-5626.436	-5649.818	-5540.077
adj R <sup>2</sup>	0.461	0.431	0.276	0.683	0.596	0.630	0.167	0.733

注：括号中为*t*值，\*表示显著性水平为10%，下同。



3.4 直接效应与空间溢出效应分析

在存在空间溢出效应的情况下，前述结果中解释变量空间滞后项系数仅在作用方向和显著性上有效<sup>[55]</sup>，用来定量描述耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响是有偏差的<sup>[18]</sup>。因此，本文采用 Lesage 等<sup>[18]</sup>提出的偏微分方法将总效应分解为直接效应和空间溢出效应，结果如表 7 所示。

表 7 基于 Durbin 模型的空间效应分解  
Table 7 The decomposition results of the spatial effects based on the SDM

变量	未考虑转型具体形态			考虑转型具体形态		
	直接效应	空间溢出效应	总效应	直接效应	空间溢出效应	总效应
<i>DFUT</i>	-0.038*** (-0.02)	-0.828* (-0.41)	-0.866 (-1.10)			
<i>RFUT</i>	-1.578*** (-3.86)	-2.911 (-1.94)	-4.489** (-2.67)			
<i>QFUT</i>				0.927** (3.26)	0.052 (0.06)	0.979 (1.02)
<i>SSFUT</i>				0.373* (2.27)	-0.254* (-0.13)	0.119 (0.19)
<i>PFFUT</i>				0.568*** (3.75)	3.441*** (6.80)	4.009*** (6.95)
<i>LFFUT</i>				-2.851*** (-7.52)	-9.874*** (-8.12)	-12.725*** (-9.72)
<i>EFFUT</i>				-3.165*** (-10.71)	3.126 (3.06)	-0.039 (-0.04)

3.4.1 耕地利用显性转型的直接效应与空间溢出效应分析

*DFUT*的直接效应和空间溢出效应系数分别为-0.038和-0.828，且分别通过了1%和10%的显著性检验。这表明*DFUT*每提升1%，能够分别减少本地和相邻县域0.038%和0.828%的耕地利用碳排放。然而，其总效应系数并不显著。进一步将*DFUT*分解为*QFUT*和*SSFUT*，由表7可知，*QFUT*的直接效应和空间溢出效应系数分别为0.927和0.052，分别占总效应的94.7%和5.3%。但是，直接效应通过了1%的显著性检验，而空间溢出效应并不显著。这表明*QFUT*每增加1%，本县域的耕地利用碳排放量将增加0.927%，但对相邻县域的影响不大。人均耕地面积和常用耕地面积的增加有利于耕地集中化开发与规模化利用，这在提高耕地产量的同时也加剧了碳排放。*SSFUT*的直接效应和空间溢出效应系数分别为0.373和-0.254，且均在10%水平下显著。这可能是因为随着农户耕种效率的提高，耕作制度逐渐由“一年一季”“一田一收”变成“一年多季”“一田多收”，粮食增产一定程度上加剧了耕地利用碳排放效应。与此同时，耕地规模经营和机械化作业可能会挤出农村剩余劳动力而产生跨区域流动<sup>[14]</sup>，要素配置进一步趋于合理。另外，采用“专业合作社+基地+农户”等多种发展模式进行合作经营，使得耕地利用活动更加频繁，从而增加了碳排放。

3.4.2 耕地利用隐性转型的直接效应与空间溢出效应分析

在未考虑耕地利用转型的具体形态时，*RFUT*的直接效应和空间溢出效应系数分别为-1.578和-2.911。这表明*RFUT*不仅能促进本县域的碳减排，还对相邻县域具有显著的

碳减排效应。进一步将 $RFUT$ 分解为 $PFFUT$ 、 $LFFUT$ 和 $EFFUT$ ，表7显示， $PFFUT$ 的直接效应和空间溢出效应系数分别为0.568和3.441，且在1%的水平下均显著，即 $PFFUT$ 每提升1%，本县域的碳排放量将增加0.568%，同时相邻县域的耕地利用碳排放量也将增加3.441%。粮食生产和产出价值的增加不仅伴随着生产活动频率的上升，还伴随着农业机械投入水平的提高，这将加剧碳排放。由于农业机械具有区域共享性<sup>[56]</sup>，农机的跨区作业有助于提升相邻县域的农业机械化水平，尽管它促进了农业生产效率，但也增加了农机化石燃料的消耗，从而进一步增加了区域耕地利用碳排放，因此总体上呈现为碳排放的协同效应。 $LFFUT$ 的直接效应和空间溢出效应系数均在1%的显著性水平下为负，这表明 $LFFUT$ 有助于促进本县域及其邻近地区的耕地利用碳减排。其原因可能是农业科学技术发展不仅有助于优化耕地利用过程的要素配置，避免了生产要素的盲目投入，还提高了耕地的生产效率，进一步挖掘了耕地低碳利用的潜力。此外，知识溢出和技术扩散也会对相邻县域产生良性的示范效应，共同促进区域的碳减排。 $EFFUT$ 对本县域碳排放的直接效应系数为-5.045，在1%的水平上显著，这表明 $EFFUT$ 对本地的碳排放有着显著的抑制作用。随着耕地利用收入水平的提高，农户对耕地低碳化利用的意愿更加强烈，从而主动优化耕作方式，进一步促进了耕地利用碳减排。然而，其空间溢出效应并不显著，这表明 $EFFUT$ 对相邻县域的耕地利用碳排放影响并不明显。这可能是由于黄淮海平原的耕地规模化利用水平较高，广泛存在的农业机械跨区服务对耕地利用碳排放产生了正向的空间溢出效应，抵消甚至超过了 $EFFUT$ 对相邻县域的碳减排效应。

### 3.5 稳健性检验

为确保前文中模型估计结果的稳健性，本文采用了以下三种方法进行稳健性检验：第一，替换空间权重矩阵。空间邻接矩阵可能忽略了地理空间距离对耕地利用碳排放的影响。因此，参考已有研究<sup>[28]</sup>，采用空间距离权重矩阵来进行估计，回归结果如表8模型（1）所示。第二，缩尾处理。为了排除面板数据中极端值的影响，对所有连续变量进行了1%和99%水平的缩尾处理，将低于1%分位或高于99%分位的数据分别替代为1%分位值和99%分位值，回归结果如表8模型（2）所示。第三，将被解释变量滞后一期。耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响可能存在时间滞后性。因此，采用被解释变量滞后一期作为被解释变量进行估计，回归结果如表8模型（3）所示。如表8所示，黄淮海平原的耕地利用转型各具体形态对耕地利用碳排放的空间影响效应的作用方向和显著性与前文基本保持一致。这进一步证实了前述结论在不同条件下仍然具有稳健性。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文在论述耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响机制和空间关联性的基础上，以黄淮海平原为研究区，采用空间计量模型进行实证研究，探究了耕地利用转型各具体形态对耕地利用碳排放的直接效应和空间溢出效应，主要结论如下：（1）在黄淮海平原，各县域之间的耕地利用转型和耕地利用碳排放都表现出显著的空间相关性与空间集聚性。（2）耕地利用显性转型对耕地利用碳排放产生了显著正向的直接效应和空间溢出效应，从而加剧了本地区 and 邻近地区的碳排放。而隐性转型则对耕地利用碳排放产生了显著负向的直接效应和空间溢出效应，对本地区和邻近地区都产生了显著的减排效应。

表8 稳健性检验结果  
Table 8 The results of robust tests

变量	(1) 替换空间权重矩阵			(2) 缩尾处理			(3) 被解释变量滞后一期		
	直接效应	空间溢出效应	总效应	直接效应	空间溢出效应	总效应	直接效应	空间溢出效应	总效应
<i>QFUT</i>	1.689*** (4.56)	-0.605 (-0.26)	1.084 (0.47)	2.035*** (5.68)	0.351 (0.32)	2.386 (1.95)	2.610*** (6.98)	2.294 (1.96)	4.904*** (3.74)
<i>SSFUT</i>	0.403** (3.07)	-1.225 (-1.95)	-0.822 (-1.31)	0.500*** (4.15)	0.757* (2.15)	1.257** (3.26)	0.616*** (4.63)	1.820*** (4.38)	2.436*** (5.30)
<i>PFFUT</i>	0.896*** (4.79)	-2.910* (-2.56)	-2.014 (-1.82)	0.429* (2.37)	2.390*** (4.20)	2.819*** (4.36)	0.614** (3.24)	2.038*** (3.33)	2.652*** (3.79)
<i>LFFUT</i>	-6.379*** (-13.64)	14.210*** (6.18)	7.831*** (3.42)	-5.701*** (-11.62)	-14.480*** (-10.19)	-20.181*** (-13.48)	-4.284*** (-8.53)	-11.930*** (-7.66)	-16.214*** (-9.78)
<i>EFFUT</i>	-5.383*** (-10.91)	9.297** (2.62)	3.914 (1.13)	-4.640*** (-10.17)	-1.722 (-1.06)	-6.362*** (-3.48)	-5.909*** (-11.93)	-4.657** (-2.62)	-10.566*** (-5.27)

(3) 不同类型的耕地利用转型中，数量转型、空间结构转型和生产功能转型对耕地利用碳排放都产生了具有显著正向的直接效应与空间溢出效应，其空间溢出效应分别占总效应的5.3%、40.5%和85.8%；生活和生态功能转型则对碳排放的影响显著为负，其空间溢出效应分别占总效应的77.6%和49.7%。

4.2 讨论

本文通过空间自相关检验发现，耕地利用碳排放与耕地利用转型均存在显著正向的空间自相关。这表明不同县域的耕地利用行为之间存在显著的相互影响，这种影响与耕地空间位置和耕地利用特性密切相关。不同于以往采用传统计量经济学模型的研究方法，本文引入了空间滞后性和空间误差项，以综合考虑耕地利用转型对碳排放的空间影响效应。同时，还将耕地利用转型进一步细分为显性转型和隐性转型，以更准确地刻画耕地利用转型的碳减排效应。因此，采用空间Durbin模型来检验耕地利用转型对耕地利用碳排放的空间影响效应。

从空间Durbin模型回归结果来看，耕地利用显性转型和隐性转型均对耕地利用碳排放产生了减排效应。特别地，耕地利用空间结构转型具有显著的负向空间溢出效应，这一发现为未来进一步推进耕地利用转型和国土空间规划提供了新的思路，即应通过土地综合整治来促进耕地的集约利用，改善耕地利用的空间结构，从而实现规模效益的提升，降低耕地利用碳排放的强度。此外，需要注意的是，在耕地利用隐性转型中，生活功能转型对耕地利用碳排放的减排贡献较大，其空间溢出效应占总效应的77.6%。因此，通过合理引导耕地利用生活功能转型，以协调区域内的耕地利用行为，可以显著降低耕地利用碳排放，有助于实现区域性的碳减排目标。

然而，由于基础数据的限制和对建模复杂性的控制，本文在评估耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响时仅考虑了耕地的碳排放作用，而忽视了耕地的碳汇功能在农业系统中的减排作用。这可能导致结果存在一定的偏差。因此，在未来的研究中，应进一步细化耕地利用碳排放测度，并将耕地的碳汇功能纳入指标体系，以提高研究结果的精确性。另外，目前的研究指标体系相对简单，且未在实证分析中排除已有的耕地利用和保

护政策的影响,这可能导致结果存在偏差。在后续研究中,应考虑不同地区的主体功能目标和耕地保护政策,以更好地控制政策因素对研究结果的影响。最后,本文仅在县域尺度上对耕地利用转型的碳效应进行了实证检验,所得结果在省域、市域或斑块等尺度上可能会有所不同。因此,尺度效应也是后续研究中需要进一步关注的问题。

### 4.3 政策建议

基于以上结论,提出以下政策建议:(1)合理、有序增加有效耕地面积。在确保耕地占补平衡的同时推进耕地进出平衡,避免耕地非农化、非粮化;在稳妥推进耕地显性转型方面,引导耕地适度规模化经营,促进要素流动渠道,提高耕地利用效率。同时,积极进行土地综合整治,以减少耕地破碎化,走“内部挖潜”而非“外部扩张”之路。在保障粮食安全的前提下,最大程度地减少耕地开发和利用过程中的碳排放。(2)充分发挥耕地利用隐性转型的碳减排效应。完善耕地利用生态补偿机制,引导农户减少农药和化肥的使用,在保障农户收益的同时提高其生态化利用耕地的积极性,推动耕地利用生活功能转型和生态功能转型,发挥其碳减排效应。同时,积极发展现代农业,探索耕地绿色利用、低碳利用的区域联动机制,发展绿色循环农业和生态农业;建设区域共享的农业基础设施,减少过度竞争和无序建设的负面效应,走“共同开发、合作共赢”之路。(3)因地制宜引导耕地利用转型。以全局谋划区域,协调好发展与保护之间的关系,按照“宜农则农、宜林则林”的原则,发挥地区比较优势;培养多元化耕地经营主体,鼓励“专业合作社+基地+农户”等多主体经营模式。同时,构建土地利用生态系统,协调耕地、林地、草地和水域的利用,以耕地利用转型促进耕地低碳利用。

### 参考文献(References):

- [1] XIA L, CAO L, YANG Y, et al. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production. *Nature Food*, 2023, 4(3): 236-246.
- [2] 刘泽森, 黄贤金, 卢学鹤, 等. 共享社会经济路径下中国碳中和路径预测. *地理学报*, 2022, 77(9): 2189-2201. [LIU Z M, HUANG X J, LU X H, et al. China's carbon neutrality path prediction under the shared social economic paths. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2189-2201.]
- [3] GRAINGER A. The forest transition: An alternative approach. *AREA*, 1995, 27(3): 242-251.
- [4] MATHER A S. Forest transition theory and the reforestation of Scotland. *Scottish Geographical Journal*, 2004, 120(1-2): 83-98.
- [5] LAMBIN E F, MEYFROIDT P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 108-118.
- [6] QU Y, LONG H. The economic and environmental effects of land use transitions under rapid urbanization and the implications for land use management. *Habitat International*, 2018, 82(12): 113-121.
- [7] LONG H, QU Y. Land use transitions and land management: A mutual feedback perspective. *Land Use Policy*, 2018, 74(4): 111-120.
- [8] GE D, LONG H, ZHANG Y, et al. Farmland transition and its influences on grain production in China. *Land Use Policy*, 2018, 70(1): 94-105.
- [9] 宋小青. 论土地利用转型的研究框架. *地理学报*, 2017, 72(3): 471-487. [SONG X Q. Discussion on land use transition research framework. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(3): 471-487.]
- [10] 胡守庚, 童陆亿, 龙花楼. 论土地利用转型潜力及其评价的理论框架. *地理研究*, 2019, 38(6): 1367-1377. [HU S G, TONG L Y, LONG H L. Land use transition potential and its assessment framework. *Geographical Research*, 2019, 38(6): 1367-1377.]
- [11] MA L, LONG H, TU S, et al. Farmland transition in China and its policy implications. *Land Use Policy*, 2020, 92(3):



- 104470, Doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104470.
- [12] 李全峰, 胡守庚, 瞿诗进. 1990—2015年长江中游地区耕地利用转型时空特征. 地理研究, 2017, 36(8): 1489-1502. [LI Q F, HU S G, QU S J. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use transition in the Middle Yangtze River from 1990 to 2015. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1489-1502.]
- [13] 刘永强, 龙花楼. 黄淮海平原农区土地利用转型及其动力机制. 地理学报, 2016, 71(4): 666-679. [LIU Y Q, LONG H L. Land use transitions and their dynamic mechanism: The case of the Huang-Huai-Hai Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 666-679.]
- [14] 卢新海, 唐一峰, 易家林, 等. 基于空间计量模型的耕地利用转型对农业经济增长影响研究. 中国土地科学, 2019, 33(6): 53-61. [LU X H, TANG Y F, YI J L, et al. Study on the impact of cultivated land use transition on agricultural economic growth based on spatial econometric model. *China Land Science*, 2019, 33(6): 53-61.]
- [15] 谭林, 陈岚. 乡村空间重构与土地利用转型耦合机制及路径分析. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1829-1847. [TAN L, CHEN L. Statistical analysis of the relationship between carbon emissions and temperature rise with the spatially heterogeneous distribution of carbon dioxide concentration. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1829-1847.]
- [16] LIU Y, LONG H, LI T, et al. Land use transitions and their effects on water environment in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Land Use Policy*, 2015, 47(9): 293-301.
- [17] 罗斯炫, 何可, 张俊飏. 修路能否促进农业增长? 基于农机跨区作业视角的分析. 中国农村经济, 2018, (6): 67-83. [LUO S X, HE K, ZHANG J B. Can road construction promote agricultural growth? An analysis based on the perspective of cross-regional operation of agricultural machinery. *Chinese Rural Economy*, 2018, (6): 67-83.]
- [18] LESAGE J, PACE R K. *Introduction to Spatial Econometrics*. New York: CRC Press, 2009: 31.
- [19] 向敬伟, 李江风. 贫困山区耕地利用转型对农业经济增长质量的影响. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 71-81. [XIANG J W, LI J F. Influence of cultivated land use transition on quality of agricultural economic growth in poor mountainous areas. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(1): 71-81.]
- [20] 卢新海, 王慧, 唐一峰, 等. 湖北省耕地利用转型对农民增收的空间溢出效应研究. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1757-1767. [LU X H, WANG H, TANG Y F, et al. Study on the spatial spillover effect of the transformation of farmland utilization on farmers' income in Hubei province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1757-1767.]
- [21] 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. 中国土地科学, 2022, 36(6): 100-112. [ZHANG Y, DAI Y Q, CHEN Y Y, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission. *China Land Science*, 2022, 36(6): 100-112.]
- [22] 李秀彬. 土地利用变化的解释. 地理科学进展, 2002, 21(3): 195-203. [LI X B. Explanation of land use changes. *Progress in Geography*, 2002, 21(3): 195-203.]
- [23] 戈大专, 龙花楼, 杨忍. 中国耕地利用转型格局及驱动因素研究: 基于人均耕地面积视角. 资源科学, 2018, 40(2): 273-283. [GE D Z, LONG H L, YANG R. The pattern and mechanism of farmland transition in China from the perspective of per capita farmland area. *Resources Science*, 2018, 40(2): 273-283.]
- [24] LAI L, HUANG X, YANG H, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601063, Doi: 10.1126/sciadv.1601063.
- [25] 金晓斌, 罗秀丽, 周寅康. 试论全域土地综合整治的基本逻辑、关键问题和主要关系. 中国土地科学, 2022, 36(11): 1-12. [JIN X B, LUO X L, ZHOU Y K. Basic logic, key issues and main relations of comprehensive land consolidation. *China Land Science*, 2022, 36(11): 1-12.]
- [26] 柯楠, 卢新海, 匡兵, 等. 碳中和目标下中国耕地绿色低碳利用的区域差异与影响因素. 中国土地科学, 2021, 35(8): 67-76. [KE N, LU X H, KUANG B, et al. Regional differences and influencing factors of green and low-carbon utilization of cultivated land under the carbon neutrality target in China. *China Land Science*, 2021, 35(8): 67-76.]
- [27] XIE W, ZHU A, ALI T, et al. Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China. *Nature*, 2023, 616(7956): 300-305.
- [28] 徐清华, 张广胜. 农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应: 基于282个城市面板数据的实证. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 23-33. [XU Q H, ZHANG G S. Spatial spillover effect of agricultural mechanization on agri-

- cultural carbon emission intensity: An empirical analysis of panel data from 282 cities. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(4): 23-33.]
- [29] 邓祥征, 蒋思坚, 刘冰, 等. 全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系的统计分析. *自然资源学报*, 2021, 36(4): 934-947. [DENG X Z, JIANG S J, LIU B, et al. Statistical analysis of the relationship between carbon emissions and temperature rise with the spatially heterogenous distribution of carbon dioxide concentration. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 934-947.]
- [30] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [31] LONG H, GE D, ZHANG Y, et al. Changing man-land interrelations in China's farming area under urbanization and its implications for food security. *Journal of Environmental Management*, 2018, 209(3): 440-451.
- [32] 包雪艳, 戴文远, 刘少芳, 等. 城乡融合区乡村地域多功能空间分异及影响因素: 以福州东部片区为例. *自然资源学报*, 2022, 37(10): 2688-2702. [BAO X Y, DAI W Y, LIU S F, et al. Spatial differentiation and influencing factors of rural territorial multi-functions in urban-rural integration area: A case study of Eastern Fuzhou. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(10): 2688-2702.]
- [33] 闫东升, 韩孟孟, 孙伟. 长江三角洲创新发展空间溢出效应的测度与分解. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1455-1466. [YAN D S, HAN M M, SUN W. Measurement and decomposition of the spatial spillover effect of innovation development in the Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1455-1466.]
- [34] WANG M, LIN N, DONG Y, et al. The impact of farmland use transition on CO<sub>2</sub> emissions and its spatial spillover effects from the perspective of major function-oriented zoning: The case of Huang-Huai-Hai plain. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 103(11): 107254, Doi: 10.1016/j.eiar.2023.107254.
- [35] 李建豹, 黄贤金. 基于空间面板模型的碳排放影响因素分析: 以长江经济带为例. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(10): 1665-1671. [LI J B, HUANG X J. Analysis of influential factors of carbon emission based on spatial panel models: A case study for Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(10): 1665-1671.]
- [36] 陈虹, 陈美球, 严格. 江西赣州市耕地碳效应时空特征分析. *国土资源科技管理*, 2022, 39(6): 28-43. [CHEN H, CHEN M Q, YAN G. Analysis on temporal and spatial characteristics of cultivated land carbon effect in Ganzhou city, Jiangxi province. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2022, 39(6): 28-43.]
- [37] WEST T O, BRANDT C C, BASKARAN L M, et al. Cropland carbon fluxes in the United States: increasing geospatial resolution of inventory-based carbon accounting. *Ecological Applications*, 2010, 20(4): 1074-1086.
- [38] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [39] 郭海红, 盖凌云. 中国农业碳效应时空分异及驱动机理研究. *宁夏社会科学*, 2021, (5): 74-84. [GUO H H, GAI L Y. Research on the spatio-temporal differentiation and driving mechanism of agricultural carbon effect in China. *Ningxia Social Sciences*, 2021, (5): 74-84.]
- [40] 谭美秋, 崔耀平, 马晓哲, 等. 河南省农田生态系统碳汇核算研究. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(9): 1129-1137. [TAN M Q, CUI Y P, MA X Z, et al. Study on carbon sink estimation of cropland ecosystem in Henan province. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(9): 1129-1137.]
- [41] 熊子听, 匡兵, 柯楠. 长江中游城市群耕地利用碳排放“总量—强度”的空间关联特征. *水土保持通报*, 2023, 43(3): 406-413. [XIONG Z X, KUANG B, KE N. Spatial correlation characteristics of amount and intensity of carbon emissions resulting from cultivated land utilization in an urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3): 406-413.]
- [42] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039. [WU F L, LI L, ZHANG H L, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039.]
- [43] WEST T O, MARLAND G, ORNL O R N L. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1): 217-232.

- [44] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [45] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 80-86. [LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86.]
- [46] 牛善栋, 方斌, 崔翠, 等. 乡村振兴视角下耕地利用转型的时空格局及路径分析: 以淮海经济区为例. *自然资源学报*, 2020, 35(8): 1908-1925. [NIU S D, FANG B, CUI C, et al. The spatial-temporal pattern and path of cultivated land use transition from the perspective of rural revitalization: Taking Huaihai Economic Zone as an example. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1908-1925.]
- [47] 付慧, 刘艳军, 孙宏日, 等. 京津冀地区耕地利用转型时空分异及驱动机制. *地理科学进展*, 2020, 39(12): 1985-1998. [FU H, LIU Y J, SUN H R, et al. Spatiotemporal characteristics and dynamic mechanism of cultivated land use transition in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Progress in Geography*, 2020, 39(12): 1985-1998.]
- [48] 戈大专, 龙花楼, 屠爽爽, 等. 黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(4): 319-327. [GE D Z, LONG H L, TU S S, et al. Coupling relationship between land use transitions and grain yield in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 319-327.]
- [49] 蒋梦凡, 李智国, 李杰, 等. 耕地利用转型突变点检测及其时空特征: 以昆明市东川区为例. *中国土地科学*, 2022, 36(3): 86-95. [JIANG M F, LI Z G, LI J, et al. Mutation point detection of cultivated land use transition and its spatial-temporal characteristics: Taking Dongchuan district of Kunming city as an example. *China Land Science*, 2022, 36(3): 86-95.]
- [50] 程建, 程久苗. 中国省际土地利用隐性形态时空格局、驱动力与转型模式. *中国土地科学*, 2017, 31(12): 60-68. [CHENG J, CHENG J M. Temporal and spatial patterns, driving forces and transformation models of hidden forms of inter-provincial land use in China. *China Land Science*, 2017, 31(12): 60-68.]
- [51] 倪梦娇, 李加林, 艾顺毅, 等. 耕地利用转型的时空格局与转移路径: 以沪浙闽为例. *浙江大学学报: 理学版*, 2023, 50(1): 108-120. [NI M J, LI J L, AI S Y, et al. Spatial-temporal pattern and transfer path of cultivated land use transition from the perspective of human-land-industry coordinated development: A case study of Shanghai, Zhejiang and Fujian. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 2023, 50(1): 108-120.]
- [52] 唐一峰, 卢新海, 张旭鹏. 公路基础设施建设对耕地利用转型的影响及门槛效应研究. *中国土地科学*, 2021, 35(1): 59-68. [TANG Y F, LU X H, ZHANG X P. Study on the impacts and threshold effects of road infrastructure construction on cultivated land use transition. *China Land Science*, 2021, 35(1): 59-68.]
- [53] 郭沛, 梁栋. 低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率: 基于低碳试点城市的准自然实验研究. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1876-1892. [GUO P, LIANG D. Does the low-carbon pilot policy improve the efficiency of urban carbon emissions: Quasi-natural experimental research based on low-carbon pilot cities. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1876-1892.]
- [54] ELHORST J P. Matlab software for spatial panels. *International Regional Science Review*, 2014, 37(3): 389-405.
- [55] 王梦成, 卢新海, 马宇翔, 等. 新能源示范城市建设对城市土地利用效率的影响及其空间溢出效应. *中国土地科学*, 2022, 36(2): 43-52. [WANG M C, LU X H, MA Y X, et al. Impact of new energy demonstration city construction on urban land use efficiency and its spatial spillover effects. *China Land Science*, 2022, 36(2): 43-52.]
- [56] 方师乐, 卫龙宝, 伍骏骞. 农业机械化的空间溢出效应及其分布规律: 农机跨区服务的视角. *管理世界*, 2017, 33(11): 65-78, 187-188. [FANG S L, WEI L B, WU J Q. The spatial spillover effect of agricultural mechanization and its distribution pattern: The perspective of interregional-service of agricultural machinery. *Journal of Management World*, 2017, 33(11): 65-78, 187-188.]

## Impact of farmland use transition on farmland use carbon emissions and its spatial spillover effects under the double carbon background: A case study of Huang-Huai-Hai Plain

WANG Meng-cheng<sup>1</sup>, DONG You-ming<sup>1</sup>, LIN Na-na<sup>1</sup>, QI Xin-xian<sup>1</sup>, HUANG Xian-jin<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Carbon Neutral and Territorial Spatial Optimization,  
Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Farmland use transition (FUT) provides a novel approach to address global farmland use carbon emissions (FUCE). This paper employs various modeling techniques, including the entropy method, spatial autocorrelation models, and spatial econometric models, using Huang-Huai-Hai Plain as a case study. It investigates the spatial impact of *FUT* on *FUCE* under the double carbon background of China. The results reveal the following: (1) In Huang-Huai-Hai Plain, there is a significant positive spatial autocorrelation among *FUCE*, *FUT*, and their specific forms. *FUCE* exhibit a spatial pattern characterized by "high in the east and low in the west" and "high in the north and low in the south". (2) The dominant farmland use transition (DFUT) can aggravate *FUCE* in both the local county and neighboring counties, while the recessive farmland use transition (RFUT) lead to carbon reduction effects in both local and nearby regions. Quantitative farmland use transition (QFUT), spatial structure farmland use transition (SSFUT), and production function farmland use transition (PFFUT) all have positive direct effects on farmland use carbon emissions, as well as discernible spatial spillover effects. Conversely, both living function farmland use transition (LFFUT) and ecological function farmland use transition (EFFUT) contribute to carbon emissions reduction. This study suggests that a prudent approach should be taken to promote moderately scaled farmland operations, adjust the spatial distribution of farmland, and develop modern, low- carbon agriculture. Tailoring farmland use transitions to local conditions is crucial, harnessing regional comparative advantages and fully realizing the carbon reduction potential of *RFUT*, thereby contributing to the achievement of dual carbon goals.

**Keywords:** double carbon goals; farmland use transition (FUT); farmland use carbon emissions (FUCE); spatial econometric model; spatial spillover effect; Huang-Huai-Hai Plain