

# 洞庭湖区耕地利用碳排放与生态效率时空特征

文高辉<sup>1,2</sup> 胡冉再琪<sup>1</sup> 唐璇<sup>1</sup> 唐雅倩<sup>1</sup> 郑佳欣<sup>1</sup> 孟晋华<sup>11</sup>

(1. 湖南师范大学 地理科学学院, 湖南 长沙 410081;

2. 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410081)

**【摘要】:** 洞庭湖区是长江经济带生态文明建设的重要节点, 研究洞庭湖区耕地利用碳排放和生态效率时空特征对推进我国生态文明建设、完成“双碳”目标具有重要意义。论文将耕地利用碳排放作为非期望产出纳入耕地利用生态效率评价体系中, 运用 SBM-Undesirable 模型, 基于县级尺度, 揭示洞庭湖区耕地利用碳排放和耕地利用生态效率的时空规律。结果表明: 2007—2017 年洞庭湖区耕地利用碳排放量呈现出“先波动上升再下降, 最后趋于平稳”的态势, 且在县级空间尺度上呈现出由 2007 年的中北部集聚分布状态演变为 2017 年的零散分布状态; 2007—2017 年洞庭湖区耕地利用生态效率总体有所提高, 且趋向于空间均衡发展。

**【关键词】:** 碳排放 生态效率 耕地利用 非期望产出 洞庭湖区

**【中图分类号】:** F301.21; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)07-132-07

2020 年, 新冠肺炎疫情全球大流行, 国际农产品市场供给特别是海外粮食供给不确定性增加, 粮食安全问题对国家的经济、社会领域影响加深, 如何在耕地资源有限的基础上提高耕地利用效率的同时兼顾生态环境可持续发展受到了各界学者的广泛重视。中国学者早期对耕地利用效率的研究多采用单要素耕地利用效率评估指标进行测算<sup>[1,2]</sup>, 为弥补单要素评价方法的不足与局限, 周晓林等<sup>[3]</sup>、叶浩和濮励杰<sup>[4]</sup>通过构建全要素耕地利用效率评价指标体系, 采用数据包络分析(DEA)或随机前沿函数(SFA)等方法来测算中国耕地利用效率; 经阳和叶长盛<sup>[5]</sup>、谢花林和张道贝<sup>[6]</sup>运用 DEA 模型分别测算江西省和鄱阳湖生态经济区的耕地利用效率, 并分析了耕地利用效率的影响因素。现有文献多以地市级行政单元为评价单元来考察全国、区域或者省域层面的耕地利用效率<sup>[4,5,6,7]</sup>, 也有少量文献逐渐深入到县域<sup>[8]</sup>、镇域<sup>[9]</sup>等较小尺度来考察区域耕地利用效率。耕地利用效率大多通过投入与产出的比值进行衡量, 投入要素主要包括土地、劳动力、资本等, 产出指标主要有粮食产量、农业产值等<sup>[4,10,11]</sup>。

2009 年哥本哈根世界气候大会的召开将人类社会对全球气候变化的关注推向了一个新的阶段, 学术界也更加关注各领域的环境问题。有研究表明, 中国农业活动所导致的温室气体排放约占全国碳排放总量的 17%<sup>[12]</sup>, 农业毋庸置疑是碳排放增加的重要推手之一。在生态文明建设的背景下, 碳排放作为耕地利用活动所产生的重要环境损耗引起国内越来越多学者的重视, 如梁流涛<sup>[10]</sup>、封永刚等<sup>[13]</sup>、匡兵和卢新海<sup>[14]</sup>将其作为“非意欲/非期望”产出纳入耕地利用生态效率评价体系中。2020 年 9 月, 中国在第七十五届联合国大会上做出“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”的庄严承诺后, 碳排放引起国内广大学者的关注。刘蒙罢等<sup>[15]</sup>基于碳排放视角测算了耕地利用生态效率, 并进而分析了 2007—2018 年长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率时空演变特征;

**作者简介:** 文高辉, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为土地利用与管理。E-mail:wgh@hunnu.edu.cn

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“耕地利用生态效率评价、驱动因子及提升机制研究——以洞庭湖平原为例”(41801190); 湖南省自然科学基金项目“耕地利用生态效率的空间格局与空间效应——以洞庭湖平原为例”(2019JJ50390); 湖南省自然资源科研项目“湖南省耕地集约利用与碳排放的时空演变规律研究”(2022-33); 湖南省大学生创新创业训练计划项目“洞庭湖流域耕地利用生态效率时空规律研究”(S202010542047); 湖南师范大学大学生创新创业训练计划项目“洞庭湖流域耕地利用生态效率时空规律研究”(2020107)

鲁庆尧等<sup>[16]</sup>分析了 2000—2018 年中国粮食生产生态效率；崔叶辰等<sup>[17]</sup>则分析了 2008—2017 年新疆农业生态效率。现有研究对提升我国耕地利用生态效率已做出了一些重要的贡献，也为本研究提供了重要的参考借鉴，但仍有值得深入探讨之处：现有文献多以省级行政单元、地市级为评价单元来考察全国、区域或者省域层面的耕地利用效率，鲜有研究基于县级尺度来测算耕地利用生态效率；较少文献将碳排放纳入耕地利用生态效率评价指标体系。

洞庭湖区是我国重要的粮食主产区和长江经济带的重要节点。基于此，本文将耕地利用碳排放作为非期望产出纳入耕地利用生态效率评价体系中，以洞庭湖区为研究区域，运用 SBM-Undesirable 模型等方法，基于县级尺度，揭示洞庭湖区耕地利用碳排放和生态效率的时空规律，以期期为洞庭湖区耕地利用可持续、农业高质量发展提供参考依据。

## 1 研究方法

### 1.1 耕地利用生态效率指标体系的构建

世界经济合作与发展组织(OECD)于 1998 年提出了生态效率的概念，将其定义为：以较少的资源消耗与较低环境损耗达到人类福利的最大化<sup>[18]</sup>。在耕地利用生态系统中，耕地作为农业生产过程中最基本的生产要素之一，也是最稀缺的土地资源，要以最小化生产要素投入达到产出的最大化，同时将对环境的损耗降至最低，以期实现社会经济发展与生态环境的协调统一。因此，耕地利用生态效率的内涵可表述为在耕地利用活动中，以一定的生产要素投入，实现社会经济产出最大化和环境损耗最小化。

碳排放是耕地利用活动所产生的主要环境损耗，为客观地反映洞庭湖区耕地利用生态效率状况，将耕地利用碳排放作为非期望产出纳入耕地利用生态效率评价体系中，构建包含投入要素、期望产出和非期望产出三个层面的耕地利用生态效率评价指标体系。参考梁流涛等<sup>[10]</sup>、匡兵和卢新海<sup>[14]</sup>、刘蒙罢等<sup>[15]</sup>的研究成果，并结合洞庭湖区耕地利用实际情况，构建了基于碳排放视角的耕地利用生态效率评价指标体系(表 1)。其中，从土地、劳动力、资本三个方面选取主要农作物播种面积、第一产业从业人员、农用机械总动力、化肥施用折纯量、农药使用量、农用薄膜使用量和有效灌溉面积作为耕地利用投入要素；选取种植业产值和粮食产量来表征耕地利用活动在经济和社会两个方面的期望产出；选取耕地利用碳排放量表征耕地利用的非期望产出。

表 1 基于碳排放视角的耕地利用生态效率评价指标体系

| 指标类别 | 变量    | 指标名称      | 单位                              |
|------|-------|-----------|---------------------------------|
| 投入要素 | 土地投入  | 主要农作物播种面积 | 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> |
|      | 劳动力投入 | 第一产业从业人员  | 10 <sup>4</sup> 人               |
|      | 农机投入  | 农用机械总动力   | kW                              |
|      | 化肥投入  | 化肥施用折纯量   | t                               |
|      | 农药投入  | 农药使用量     | t                               |
|      | 农膜投入  | 农用薄膜使用量   | t                               |
| 期望产出 | 灌溉投入  | 有效灌溉面积    | 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> |
|      | 经济产出  | 种植业产值     | 10 <sup>4</sup> 元               |
|      | 社会产出  | 粮食产量      | t                               |

|       |     |           |   |
|-------|-----|-----------|---|
| 非期望产出 | 碳排放 | 耕地利用碳排放总量 | t |
|-------|-----|-----------|---|

注：由于农用柴油主要用于农用机械产生动力，避免指标重复，故在投入指标中不再考虑农用柴油。而在计算碳排放量时则用农用柴油使用量代替农用机械总动力进行计算。

参考相关研究成果<sup>[14, 15, 16, 17, 19]</sup>，耕地利用碳排放量主要依据农用化肥使用量、农药使用量、农用薄膜使用量、有效灌溉面积、农用柴油使用量 5 个指标进行测算。碳排放系数及碳排放量计算方法借鉴李波等<sup>[20]</sup>的研究成果。耕地利用碳排放量计算公式为：

$$E = \sum E_i = \sum T_i \times \delta_i \quad (1)$$

式中：E 为耕地利用碳排放总量；E<sub>i</sub> 为各类碳源的碳排放量；T<sub>i</sub> 为各碳源的量；δ<sub>i</sub> 为各碳源的碳排放系数，如表 2 所示。

### 1.2 SBM-Undesirable 模型

表 2 耕地利用碳排放系数

| 碳源   | 碳排放系数                       | 参考来源                           |
|------|-----------------------------|--------------------------------|
| 化肥   | 0.8956kg · kg <sup>-1</sup> | West & Marland <sup>[21]</sup> |
| 农药   | 4.9341kg · kg <sup>-1</sup> | Post & Kwon <sup>[18]</sup>    |
| 农膜   | 5.18kg · kg <sup>-1</sup>   | 李波等 <sup>[20]</sup>            |
| 灌溉   | 25kg · hm <sup>-2</sup>     | 李波等 <sup>[20]</sup>            |
| 农用柴油 | 0.5927kg · kg <sup>-1</sup> | Eggleston 等 <sup>[22]</sup>    |

SBM-DEA 克服了传统 DEA 模型存在的径向和角度问题，较好地解决了实际生产中投入产出的松弛性问题。其中由 SBM-DEA 衍生的 SBM-Undesirable 模型（非期望产出的 SBM-DEA 模型），可以测算包含非期望产出的耕地利用生态效率，其测算的 DMU 无效率是投入与产出无效率的乘积，能够实现无效决策单元中效率值对当前状态与强有效目标值间松弛改进部分的测量，更能反映实际生产状况<sup>[13]</sup>。鉴于此，本文采用 SBM-Undesirable 模型来测算洞庭湖区各县耕地利用生态效率。

假定在耕地利用过程中，有 m 个投入指标 X，s 个期望产出指标 Y 以及 k 个非期望产出指标 Z，则包含非期望产出的 SBM-Undesirable 模型表达式为：

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{m=1}^M \left( \frac{X'_m}{X_{mk}} \right)}{1 + \frac{1}{S+K} \left( \sum_{s=1}^S \frac{Y'_s}{Y_0} \right) + \sum_{m=1}^M \left( \frac{Z'_m}{Z_0} \right)}$$

$$\begin{aligned}
& \text{s.t. } \sum_{i=1, \neq n}^N X_{mi} \lambda_i - X'_m \leq 0, \quad m=1, 2, \dots, M \\
& \sum_{i=1, \neq n}^N Y_{si} \lambda_i - Y'_s \geq 0, \quad s=1, 2, \dots, S \\
& \sum_{i=1, \neq n}^N Z_{ki} \lambda_i - Z'_k \leq 0, \quad k=1, 2, \dots, K \\
& X'_m \geq X_{mi}, \quad m=1, 2, \dots, M \\
& Y'_s \geq Y_{si}, \quad s=1, 2, \dots, S \\
& Z'_k \geq Z_{ki}, \quad k=1, 2, \dots, K
\end{aligned} \tag{2}$$

式中：X、Y、Z 分别代表耕地利用的投入要素、期望产出和非期望产出指标，投入要素、期望产出和非期望产出指标的个数分别为 M、S、K。 $\rho$  是效率值，且  $0 \leq \rho \leq 1$ 。当  $\rho=1$  时，表示生产单元完全有效率，此时  $X' = Y' = Z' = 0$ ；当  $\rho < 1$  时，表示生产单元存在效率损失，投入产出需要调整。

## 2 研究区域与数据来源

### 2.1 研究区域概况

洞庭湖区是我国重要的粮食主产区和长江经济带的重要节点。洞庭湖区属于典型的亚热带季风气候，年均气温约 17.0℃，降水丰沛，区域内水网密布、湖坑众多，农业生产资源要素丰富，是中国重要的商品粮生产基地。鉴于学术界对洞庭湖区没有统一的界定，本文选取较为公认的岳阳市、常德市、益阳市作为研究区域，以 2007—2017 年为研究时期。研究期内，洞庭湖区农业产值从  $111.45 \times 10^8$  元提升至  $234.62 \times 10^8$  元，粮食总产量从  $1780.16 \times 10^4$  t 提升至  $1832.98 \times 10^4$  t，农村居民人均可支配收入从 4324.61 元提升至 14265 元，农业生产对推动当地经济发展有着不可替代的重要作用。然而，当前洞庭湖区农户注重耕地经济产出，对耕地重用轻养，在农业生产过程中轻有机肥、重化肥，造成严重的耕地面源污染。有研究表明，洞庭湖水体主要受到 TN 和 TP 的污染，且农业面源污染已经成为洞庭湖富营养化的主要原因之一，而 TN 和 TP 主要来源于耕地利用活动<sup>[23]</sup>。国家高度重视粮食主产区耕地保护和高标准基本农田建设，洞庭湖区是我国农地整治重点区域。

### 2.2 数据来源

本文数据来源于《湖南农村统计年鉴》(2008—2018 年)和《湖南统计年鉴》(2008—2018 年)。

## 3 结果与分析

### 3.1 洞庭湖区耕地利用碳排放时空特征

#### 3.1.1 耕地利用碳排放时间规律

图 1 和图 2 分别反映了 2007—2017 年洞庭湖区整体及各市单位耕地面积碳排放量的时间变化趋势。从洞庭湖区整体单位耕地面积碳排放量来看，2007—2017 年洞庭湖区耕地利用碳排放量总体呈现出先波动上升再下降，最后趋于平稳的态势，单位耕地面积碳排放量由 2007 年的  $2.89 \text{ t/hm}^2$  降至 2017 年的  $2.69 \text{ t/hm}^2$ ，具有明显的阶段性特征：2007—2012 年洞庭湖区单位耕地面积碳排放量呈现出波动上升的态势，其中在 2009 年和 2012 年出现两个峰值，2012 年达到单位耕地面积碳排放量最大值  $3.04 \text{ t/hm}^2$ ；2012—2017 年单位耕地面积碳排放量呈下降态势。从各地级市来看，益阳市单位耕地面积碳排放量在 3 市中最高，单位耕地面

积碳排放量在  $2.73\text{t}/\text{hm}^2 \sim 3.51\text{t}/\text{hm}^2$  范围内先波动上升再下降, 2012 年达到最大值  $3.51\text{t}/\text{hm}^2$ ; 岳阳市次之, 单位耕地面积碳排放量在  $3.14\text{t}/\text{hm}^2 \sim 2.69\text{t}/\text{hm}^2$  范围内平稳下降, 2007—2013 年趋于平稳, 2013—2016 年呈下降趋势, 2016 年达到最小值  $2.69\text{t}/\text{hm}^2$ , 2016—2017 年略有上升; 常德市单位耕地面积碳排放量最低, 波动范围为  $2.67\text{t}/\text{hm}^2 \sim 2.46\text{t}/\text{hm}^2$ , 总体呈现出先升后降最后趋于平稳的态势, 2007—2009 年单位耕地面积碳排放量略有上升, 2009—2010 年有所下降, 2010 年达到最小值  $2.46\text{t}/\text{hm}^2$ , 2010—2017 年趋于平稳。总体而言, 益阳市和岳阳市的单位耕地面积碳排放量在研究期限内整体变化幅度较大, 总体呈现出先波动上升再下降的态势; 而常德市的单位耕地面积碳排放量前期略有波动, 后期持续保持平稳。

### 3.1.2 耕地利用碳排放空间格局

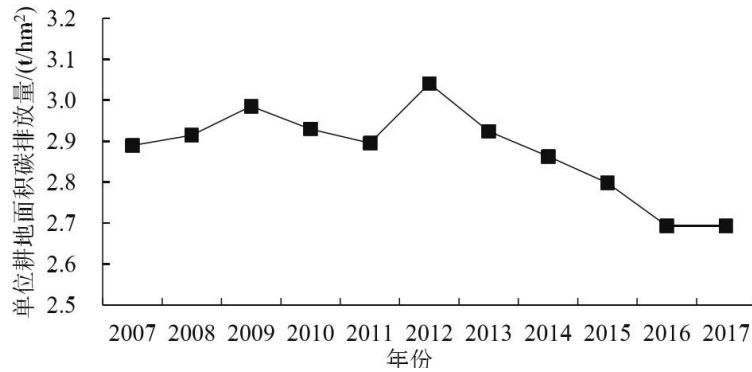


图 1 2007—2017 年洞庭湖区整体单位耕地面积碳排放量变化趋势

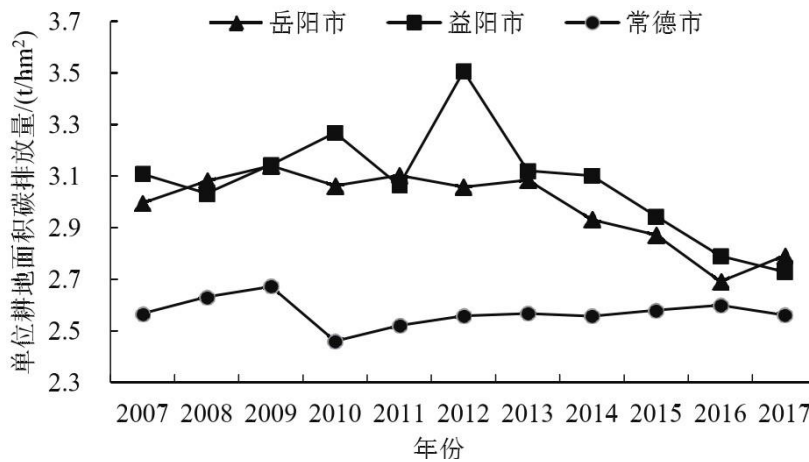


图 2 2007—2017 年洞庭湖区市级单位耕地面积碳排放量变化趋势

图 3 反映的是 2007 年、2012 年和 2017 年洞庭湖区各县(市、区)单位耕地面积碳排放量的空间分布情况。利用 ArcGIS, 将单位耕地面积碳排放量(单位为  $\text{t}/\text{hm}^2$ )划分为五个等级, 由低至高依次为低碳排放区 ( $1.480000, 3.204000$ ]、较低碳排放区 ( $3.204000, 4.958000$ ]、中等碳排放区 ( $4.958000, 6.712000$ ]、较高碳排放区 ( $6.712000, 8.466000$ ] 和高碳排放区 ( $8.466000, 10.220000$ )。

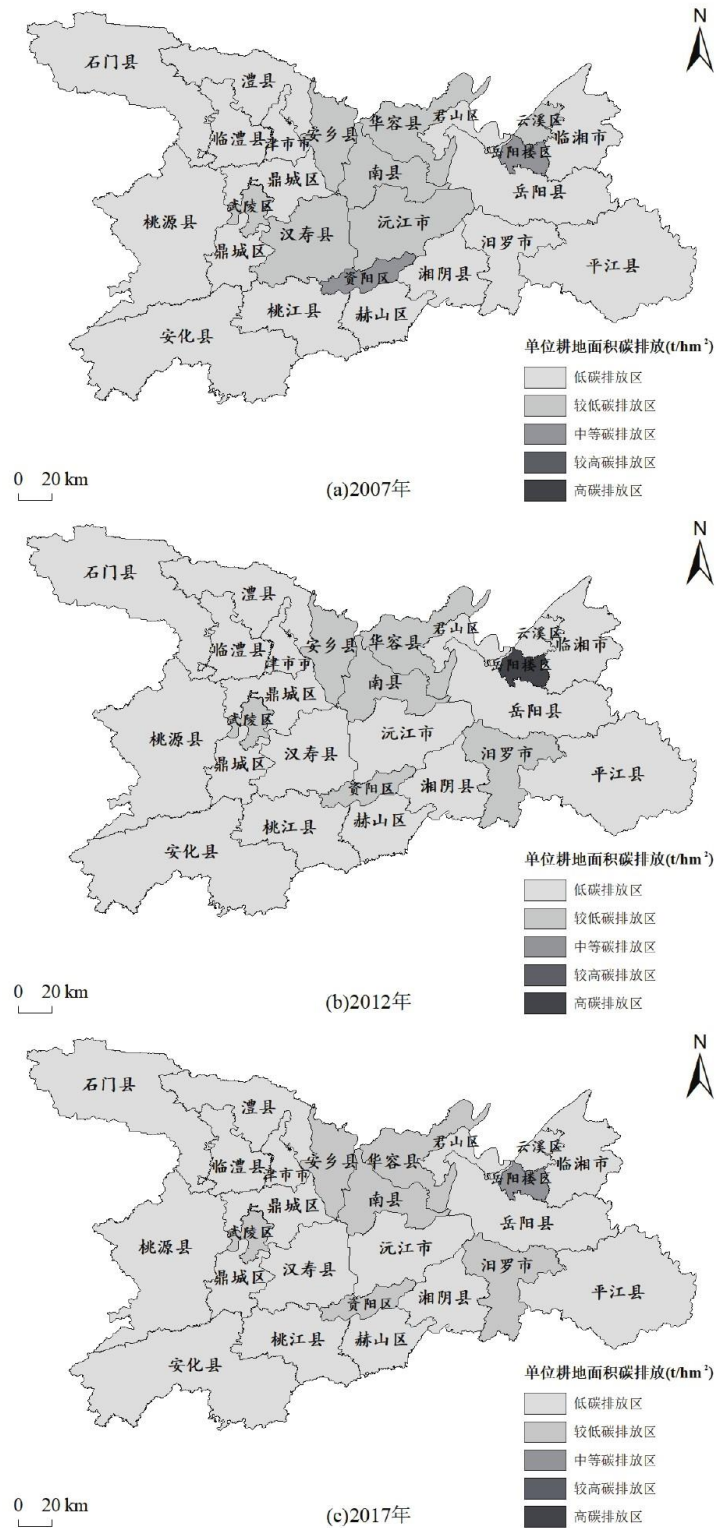


图3 洞庭湖区单位耕地面积碳排放量空间格局

从整体上看, 2007年、2012年和2017年, 各县(市、区)单位耕地面积碳排放量与周边单位联系密切, 相邻行政单位其单位耕地面积碳排放量多处于同一等级, 单位耕地面积碳排放量相似的县级(市、区)行政单位在空间上呈现空间集聚状态且大部分

处于 1.45t/hm<sup>2</sup>~3.24t/hm<sup>2</sup> 范围内，特别是 2007 年集聚现象较为明显，2012 年和 2017 年集聚现象有所减弱，偏向分散。具体来看，2007 年有 2 个区(岳阳市的岳阳楼区、益阳市的资阳区)为中等碳排放区，有 7 个县(区)(常德市武陵区、汉寿县、沅江市、南县、安乡县，和岳阳市华容县、云溪区)，可见中等碳排放区和较低碳排放区主要分布在洞庭湖区的中部、北部和东北部；其他的 16 个县(市、区)均为低碳排放区，分布在洞庭湖区的东部、南部和西部。2012 年，资阳区由先前的中等碳排放区演变为较低碳排放区，单位耕地面积碳排放量降低了 1 个等级；汉寿县、沅江市和云溪区由先前的较低碳排放区演变为低碳排放区，单位耕地面积碳排放量降低了 1 个等级；而岳阳楼区由先前的中等碳排放区演变为高碳排放区，单位耕地面积碳排放量上升了 2 个等级；汨罗市也从低碳排放区演变为较低碳排放区，单位耕地面积碳排放量上升了 1 个等级。截至 2017 年，与 2012 年相比，各县(市、区)单位耕地面积碳排放量等级变化不大，仅有岳阳楼区由高碳排放区降至中等碳排放区，降低了 2 个等级。总体来看，洞庭湖区耕地利用较低碳排放区和中等碳排放区的空间分布特征由 2007 年中北部集聚分布演变为 2017 年的零散分布。

### 3.2 洞庭湖区耕地利用生态效率时空特征

#### 3.2.1 耕地利用生态效率时间规律

图 4 反映了 SBM-Undesirable 模型和 CCR 模型两种方法测算得到的 2007—2017 年洞庭湖区耕地利用效率值。由图 4 可知，2007—2017 年洞庭湖区的耕地利用生态效率均低于 CCR 模型(只考虑投入指标和期望产出指标)测算出的耕地利用效率，2007 年前者测算值比后者低了 0.117，且总体上呈现减小的趋势，2017 年两种模型测算出的耕地利用效率测算值仅相差 0.021，说明耕地利用碳排放量总体上在逐年下降。可见，CCR 模型测算得到的洞庭湖区耕地利用效率偏高，忽视了耕地利用活动所产生的环境损耗问题，而 SBM-Undesirable 模型测算出的耕地利用生态效率更加科学，更符合洞庭湖区实际情况。因此，后文均采用 SBM-Undesirable 模型测算出的耕地利用生态效率进行分析。

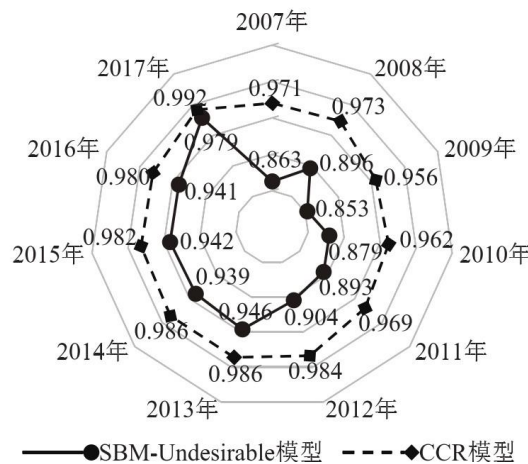


图 4 SBM-Undesirable 模型和 CCR 模型测算出的耕地利用效率

由图 5 可知，2007—2017 年，从洞庭湖区整体来看，洞庭湖区耕地利用生态效率总体呈现波动上升趋势，均值由 0.863 提高至 0.979，累计增幅为 13.44%。从市域尺度来看，岳阳市的耕地利用生态效率变化趋势与洞庭湖区变化趋势最为契合，其耕地利用生态效率由 2007 年的 0.833 提高至 2017 年的 0.971，累计变化率为 16.57%；益阳市的耕地利用生态效率由 2007 年的 0.750 提高至 2017 年的 0.994，累计变化率最高，为 32.53%，在 2007—2012 年，益阳市的耕地利用生态效率均低于洞庭湖区平均水平，而在 2013—2017 年，益阳市的耕地利用生态效率超过了洞庭湖区平均水平；常德市的耕地利用生态效率比较稳定，由 2007 年的 0.969 略升至 2017 年的 0.976，累计变化率低至 0.72%，总体保持在 0.960 左右小范围波动。

### 3.2.2 耕地利用生态效率空间格局

按照涂正革<sup>[24]</sup>对效率的分类方法, 本文将耕地利用生态效率值分为(0.9, 1.0]、(0.8, 0.9]、(0.7, 0.8]、(0.6, 0.7]和(0, 0.6]五个区间, 与之对应的五个等级称为高效率地区、较高效率地区、中等效率地区、较低效率地区和低效率地区。图6展示了2007年、2012年和2017年洞庭湖区耕地利用生态效率的空间分布状况。

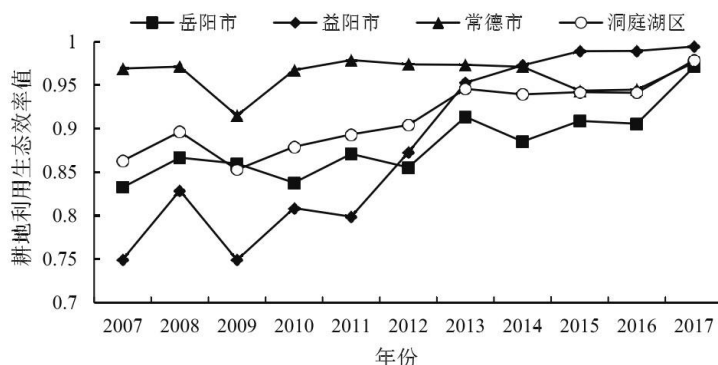


图5 2007—2017年洞庭湖区耕地利用生态效率变化趋势

由图6可知, 2007—2017年, 洞庭湖区多个县(市、区)耕地利用生态效率低效率区和较低效率区变为高效率区, 其空间分布特征具体表现为: 2007年, 有2个县(市、区)(岳阳市的云溪区、益阳市的沅江市)属于耕地利用低效率地区, 主要分布在洞庭湖区的中北部; 有5个县(市、区)(岳阳市的华容县、汨罗市, 益阳市的资阳区、南县、安化县)属于耕地利用较低效率地区, 主要分布于洞庭湖区的中部和西南部。2012年, 洞庭湖区无低效率地区, 2007年的耕地利用低效率地区分别提升为中等效率地区(沅江市)和较低效率地区(云溪区); 2007年的5个耕地利用较低效率地区中有4个提升至2012年的较高效率地区或中等效率地区, 而安化县耕地利用生态效率等级未发生变化; 而岳阳市的临湘市和平江县的耕地利用生态效率等级由2007年的高效率地区分别降低至2012年的较高效率地区和中等效率地区, 其主要原因是2007—2012年, 临湘市和平江县的化肥、农膜、农药等生产要素均存在不同程度的冗余增加。截至2017年, 洞庭湖区已无耕地利用低效率地区和较低效率地区, 仅有2个县(岳阳市的平江县、益阳市的澧县)为耕地利用中等效率地区, 其余22个县都为耕地利用高效率地区。从各年耕地利用生态效率空间分布状况来看, 洞庭湖区耕地利用生态效率由2007年的西高东低转变为2017年区域整体均衡发展的态势, 各县(市、区)的耕地利用生态效率渐渐稳定在一个较高的发展水平, 但仍然存在一定的发展进步空间。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

基于县级尺度, 采用SBM-Undesirable模型测算了洞庭湖区24个县(市、区)2007—2017年的耕地利用生态效率, 探讨了洞庭湖区耕地利用碳排放与生态效率的时空格局, 主要结论为: (1)2007—2017年洞庭湖区耕地利用碳排放量呈现出先波动上升再下降, 最后趋于平稳的态势, 单位耕地面积碳排放量由2007年的 $2.89\text{t}/\text{hm}^2$ 降至2017年的 $2.69\text{t}/\text{hm}^2$ 。其中, 益阳市单位耕地面积碳排放量在3市中最高, 岳阳市次之, 常德市最低。此外, 洞庭湖区单位耕地面积碳排放量在县级尺度上呈现出由2007年的中北部集聚分布状态演变为2017年的零散分布状态。(2)2007—2017年洞庭湖区耕地利用生态效率总体有所提高, 且趋向于空间均衡发展, 由2007年的0.863升至2017年的0.979。从洞庭湖区耕地利用生态效率空间分布状况来看, 洞庭湖区耕地利用生态效率由2007年的西高东低转变为2017年区域整体均衡发展的态势, 各县(市、区)的耕地利用生态效率渐渐稳定在一个较高的发展水平。

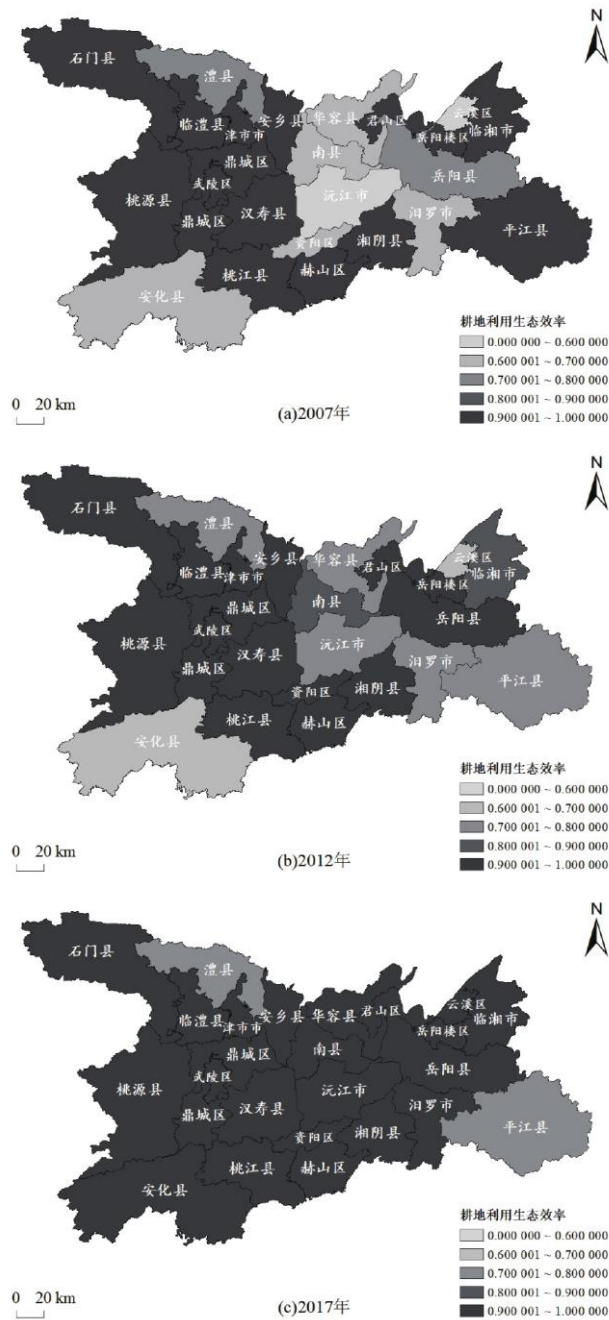


图 6 洞庭湖区耕地利用生态效率空间格局

综上所述，洞庭湖区对控制耕地利用碳排放量和提高耕地利用生态效率取得了一定的成效，但仍存在一定优化空间，区域系统有待完善，各县级、市级差距仍需缩小。对此，应当具有全局视野的高度站位，洞庭湖区耕地利用和农业发展需兼顾整体性和差异性，在充分发挥农业发展高水平区域带头作用的同时，弥补落后地区的发展短板，综合考虑本地区与邻近地区之间的空间互动关系，加强县际间在耕地资源利用和农业发展上的空间联动效应，以实现洞庭湖区整体的“质”的发展。

#### 4.2 讨论

通过上述研究,未来可从以下几个方面进一步深入探讨:(1)所构建的耕地利用生态效率评价指标体系仅考虑了耕地利用活动所产生的碳排放,而未考虑农作物生长过程中的碳吸收(即碳汇);另外,仅将碳排放作为非期望产出纳入耕地利用生态效率评价指标体系,并未考虑耕地利用活动造成的面源污染问题。因此,未来可从净碳排放量(碳排放—碳吸收)和面源污染两个方面来完善耕地利用生态效率评价指标体系中的非期望产出指标,进而测算出更科学精准的耕地利用生态效率。(2)在运用 SBM-Undesirable 模型测算耕地利用生态效率时,将期望产出与非期望产出权重比设定为 1:1(即默认比值),未考虑社会经济发展阶段和区域社会经济发展的差异性。在不同时期(即社会经济发展阶段),耕地利用活动的目标不同,如在社会经济发展较低阶段,耕地利用活动更多的是满足人类对粮食和农产品的数量需求,在测度耕地利用生态效率时应该赋值较高的期望产出权重;而社会经济发展至较高阶段时,人们更加追求粮食和农产品的质量品质,在测度耕地利用生态效率时应该赋值较高的非期望产出权重;在社会经济较发达的地区,其累积污染量可能已逼近生态环境最高承载力水平,应该高度重视社会经济发展所产生的非期望产出,在测度耕地利用生态效率时应赋值其较高的权重;而在社会经济欠发达的地区,其污染累积量相对较小,在测度耕地利用生态效率时,可综合考虑地区发展定位,赋值合理的非期望产出权重。因此,基于社会经济发展阶段和区域社会经济发展的差异性来设置合理的期望产出与非期望产出权重比值也是未来重点关注的方向。

### 参考文献:

- [1]谢高地,成升魁,丁贤忠.人口增长胁迫下的全球土地利用变化研究[J].自然资源学报,1999(3):193-199.
- [2]方先知.土地利用效率测度的指标体系与方法研究[J].系统工程,2005(12):22-26.
- [3]周晓林,吴次芳,刘婷婷.基于 DEA 的区域农地生产效率差异研究[J].中国土地科学,2009(3):60-65.
- [4]叶浩,濮励杰.我国耕地利用效率的区域差异及其收敛性研究[J].自然资源学报,2011(9):1467-1474.
- [5]经阳,叶长盛.基于 DEA 的江西省耕地利用效率及影响因素分析[J].水土保持研究,2015(1):257-261.
- [6]谢花林,张道贝.鄱阳湖生态经济区耕地利用效率时空差异及其影响因素分析[J].水土保持研究,2016(5):214-221.
- [7]张立新,朱道林,谢保鹏,等.中国粮食主产区耕地利用效率时空格局演变及影响因素——基于 180 个地级市的实证研究[J].资源科学,2017(4):608-619.
- [8]戴劲,彭文英,连莉,等.基于 DEA 的东北黑土区耕地利用效率研究——以嫩江县为例[J].干旱区资源与环境,2017(6):38-43.
- [9]张霞,刘秀华,刘勇.基于 DEA 的高家镇耕地利用效率及其影响因素研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2012(3):72-77.
- [10]梁流涛.考虑“非意愿”产出的农业土地生产效率评价及其时空特征分析[J].资源科学,2012(12):2249-2255.
- [11]张荣天,焦华富.中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J].农业工程学报,2015(2):277-287.
- [12]董红敏,李玉娥,陶秀萍,等.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008(10):269-273.
- [13]封永刚,彭珏,邓宗兵,等.面源污染、碳排放双重视角下中国耕地利用效率的时空分异[J].中国人口·资源与环境,

---

2015(8): 18-25.

[14]匡兵, 卢新海. 考虑碳排放的粮食主产区耕地利用效率区域差异与变化[J]. 农业工程学报, 2018(11): 1-8.

[15]刘蒙罢, 张安录, 文高辉. 长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J]. 中国土地科学, 2021(2): 50-60.

[16]鲁庆尧, 王树进, 孟祥海. 基于 SBM 模型的我国粮食生产生态效率测度与 PS 收敛检验[J]. 农村经济, 2020(12): 24-32.

[17]崔叶辰, 韩亚丽, 吕宁, 等. 基于超效率 SBM 模型的农业生态效率测度[J]. 统计与决策, 2020(21): 87-90.

[18]Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.

[19]丁宝根, 杨树旺, 赵玉, 等. 中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J]. 中国土地科学, 2019(12): 45-54.

[20]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[J]. 中国人口·资源与环境, 2011(8): 80-86.

[21]West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 91(1): 217-232.

[22]Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

[23]杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策[J]. 中国生态农业学报, 2019(2): 236-245.

[24]涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008(2): 93-105.