

# 粮食安全与“双碳”视角下黄河流域农田生态补偿额度

姚石<sup>1</sup>, 张秋泽<sup>1</sup>, 刘俊娟<sup>1</sup>, 胡悦<sup>1</sup>, 侯建<sup>1</sup>, 马恒运<sup>2</sup>

(1.河南农业大学 信息与管理科学学院, 河南 郑州 450000; 2.河南农业大学 经济与管理学院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** [目的] 测算从粮食安全和“双碳”两个视角下的农田生态补偿额度, 并将流域上中下游的地理空间、经济贡献度等因素综合考虑在内划分生态补偿区域, 为流域高标准农田建设、农业低碳发展、健全利益补偿机制提供理论参考。[方法] 首先从粮食安全的角度对黄河流域内 60 个地级市进行了农田盈亏量的测算, 基于机会成本法建立了粮食安全视角下的农田生态补偿标准; 接着, 计算黄河流域各市农业生产过程中, 使用的农业资源与农作物生长过程所产生的碳排放量, 估计农作物生长中通过光合作用吸收碳的总量。根据所得碳源、碳汇量计算该区域内农田的总净碳汇量。以 2021 年碳交易平均价格为补偿标准, 求出“双碳”视角下区域内农田生态补偿标准。最后, 在分别计算粮食安全与“双碳”视角下的农田生态补偿额度的基础上, 得出双视角下黄河流域的农田生态补偿额度。[结果] 青海、河南省内黄河流经的市大多都接受一定的补偿。部分省会城市如西安、郑州与太原市因城镇化与工业化水平较高, 经济发展情况良好, 需要支付的农田生态补偿额度较高, 说明当地农田安全与粮食、生态安全间的矛盾问题更严重。[结论] 在高标准农田的建设中, 为更合理地进行农田生态补偿, 应在保障粮食安全的前提下, 结合考虑农业生产过程中的碳排放与碳吸收量, 以实现中国的“双碳”目标, 助力农业强国建设。

**关键词:** 黄河流域; 高标准农田; 农田生态补偿; 粮食安全; 碳源; 碳汇

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0399-09

中图分类号: S181

**文献参数:** 姚石, 张秋泽, 刘俊娟, 等. 粮食安全与“双碳”视角下黄河流域农田生态补偿额度[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 399-407. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240627.002; Yao Shi, Zhang Qiuze, Liu Junjuan, et al. Farmland ecological compensation amount in Yellow River basin from food security and “dual carbon” perspectives [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 399-407.

## Farmland Ecological Compensation Amount in Yellow River Basin From Food Security and “Dual Carbon” Perspectives

Yao Shi<sup>1</sup>, Zhang Qiuze<sup>1</sup>, Liu Junjuan<sup>1</sup>, Hu Yue<sup>1</sup>, Hou Jian<sup>1</sup>, Ma Hengyun<sup>2</sup>

(1. School of Information and Management Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450000, China; 2. School of Economics and Management, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450000, China)

**Abstract:** [Objective] The farmland ecological compensation amounts were calculated from the perspectives of food security and “double carbon”. The geographical space and economic contribution degree of the upper, middle, and lower reaches of the basin were comprehensively considered to divide the ecological compensation areas, in order to provide a theoretical reference for the construction of high-standard farmland, low-carbon agricultural development, and improvement of the benefit compensation mechanism in the basin. [Methods] We measured the profits and losses of farmland in 60 cities within the Yellow River basin from the perspective of food security, established a standard for farmland ecological compensation based on the opportunity cost method, calculated carbon emissions from agricultural resources used in production and crop growth across these cities, estimated total carbon absorption through photosynthesis during crop growth, and determined the net carbon sink of farmland in this region by considering both

收稿日期: 2024-02-21

修回日期: 2024-04-01

资助项目: 河南省教育厅人文社会科学基金项目“河南沿黄地区农田重金属土壤污染的关键因素及分阶段管控方案研究”(2021-ZZJH-161); 国家社会科学基金项目“‘双碳’目标下数字经济转型的碳减排效应机制研究”(22CJY058)

第一作者: 姚石(1991—), 女(汉族), 河南省平顶山市人, 博士, 讲师, 硕士生导师。主要从事可持续发展管理研究。Email: lemon-yao@163.com。

通信作者: 刘俊娟(1974—), 女(汉族), 河南省滑县人, 博士, 讲师。主要从事可持续发展管理研究。Email: zzzjliu@qq.com。

sources and sinks. The average carbon trading price in 2021 served as the compensation standard for calculating regional farmland ecological compensation from a “dualcarbon” perspective. Finally, by calculating farmland ecological compensation amounts separately under perspectives of food security and “doublecarbon”, we obtain comprehensive figures for dual-perspective ecological compensation within the Yellow River basin. [Results] Most cities in Qinghai and Henan provinces, where the Yellow River flows, accept certain compensation levels. Provincial capitals such as Xi’an, Zhengzhou, and Taiyuan City need to pay higher amounts due to their significant urbanisation level, industrialisation progress, and robust economic development. These findings highlighted a more pronounced conflict between local farmland security and food and ecological security. [Conclusion] In constructing high-standard farmland, carbon emissions and carbon absorption in the agricultural production process should be considered to ensure food security and to make farmland ecological compensation more reasonable, to achieve the goal of “dualcarbon” in China and to help the construction of powerful agricultural country.

**Keywords:** Yellow River basin; high-standard farmland; farmland ecological compensation; food security; carbon source; carbon sink

农田保护尤其是高标准农田建设,对于提高国家粮食综合生产力、改善农田生态环境具有重要意义,也为推进农业现代化奠定了坚实的基础<sup>[1]</sup>。“双碳”是国家重大战略,现代化农业在响应国家战略的同时也应担当起粮食安全保障的重任。黄河流域分布着中国多个粮食主产区,不同流域间自然禀赋的差异决定了现实中农田保护权责的不对等<sup>[2]</sup>,而农田生态补偿制度是协调农田生态保护与经济发展关系、调动利益相关者积极性、建设农业强国的重要手段。

当前,国内外学者已围绕生态补偿的补偿机制<sup>[3-4]</sup>、补偿标准<sup>[5-6]</sup>、补偿意愿<sup>[7-8]</sup>、补偿效果评价<sup>[9-10]</sup>等内容开展了研究,对象集中于农田/耕地、森林<sup>[11]</sup>、湿地<sup>[12]</sup>等,其中以往对农田生态补偿的研究多是围绕单一视角进行的<sup>[13-14]</sup>,尽管有学者从粮食安全与生态安全的双视角开展研究<sup>[15-16]</sup>,但在以碳达峰、碳中和(以下简称“双碳”)为新发展引擎的生态文明制度背景下<sup>[17]</sup>,加上农田生态系统是重要的温室气体排放源之一,全球 10%~20%的碳排放来源于农业生产活动<sup>[18]</sup>,却鲜有研究在农田生态补偿制度中纳入碳汇价值进行优化。此外,尽管现有的补偿模式集中于纵向补偿<sup>[19]</sup>,但横向补偿更能矫正利益分配不公带来的区域发展失衡问题<sup>[20]</sup>,且空间尺度从省内逐渐转为跨省流域,随着国家重大战略的提出黄河流域成为研究热点区域之一,上下游政府间的转移支付演变为横向补偿的主要形式<sup>[21]</sup>,却鲜有从市级层面开展研究的。

基于此,本文将以黄河流域 60 个地级市为研究对象,从粮食安全和“双碳”两个视角进行农田生态补偿额度的测算,为流域高标准农田建设、农业低碳发展、健全利益补偿机制提供理论参考。

## 1 研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,自西向东分别流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南及山东 9 个省(自治区),最后由东营市流入渤海,其河流共计流程约 5 464 km。鉴于数据的可获得性和连续性,在以自然流域为依据,确保完整的地区级行政区划单元及黄河与地区经济发展的关联性<sup>[22]</sup>。本文选取的研究对象为流域内的 60 个地级市(见图 1)。黄河流域总土地面积  $7.93 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ,占全国国土面积的 8.3%,其中大部分为山区与丘陵;2021 年黄河流域常住人口约为  $2.38 \times 10^8$  人,占全国总人口的 16.85%;全区域耕地面积约  $2.49 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,占全国农田总面积的 20%;如今,黄河流域是中国农业最发达的地区之一,在农业发展、生态文明建设中占有重要地位。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 粮食安全视角下的农田生态补偿标准测算方法

2.1.1 农田盈亏量的测算 一个区域对农田面积的需求,主要受到当地常住人口数、人均粮食消费量、粮食自给率、粮食单产、农田播种面积与农作物种植结构的影响<sup>[23]</sup>。用区域内已有的农田面积减去需求量,即为农田生态赤字/盈余量(S)。

$$S = S_s - S_D = S_s - \frac{P \times N_{ij} \times K}{F_{ij}} \quad (1)$$

式中:S 表示农田盈亏量( $\text{hm}^2$ );  $S_s$  和  $S_D$  分别表示农田实际存量与农田需求量( $\text{hm}^2$ );  $P$  表示人均粮食消费量( $\text{kg}/\text{人}$ );  $N_{ij}$  表示第  $i$  年  $j$  区域常住人口数(万人);  $K$  表示粮食自给率(%);  $F_{ij}$  为第  $i$  年  $j$  区域粮食单产( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。



图 1 黄河流域分区及地级市分布

Fig.1 Distribution of subareas and prefecture-level cities of Yellow River basin

2.1.2 粮食安全视角下农田生态补偿标准的测算

本文中计算的农田生态补偿标准是基于机会成本法,以农田转化为建设用地所获得的土地出让金和相关税收作为失去的机会成本<sup>[15]</sup>;由土地均质假设可得,农田转变为建设用地的平均收益约为城镇/城乡交错地带建设用地使用权年收益的 1/2<sup>[24]</sup>,这包括:农田主要有耕地占用税、土地使用权出让契税和土地出让金纯收益 3 个方面的收益来源。

$$FS = W / 2 =$$

$$\left[ \frac{(P_1 + P_2 + P_3) \times r \times (1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \right] / 2 \quad (2)$$

式中:FS 为粮食安全视角下的农田生态补偿标准(元/hm<sup>2</sup>);W 表示建设用地的使用权年收益(元/hm<sup>2</sup>);P<sub>1</sub> 表示土地出让金纯收益(元/hm<sup>2</sup>);P<sub>2</sub> 表示土地使用权出让契税(元/hm<sup>2</sup>);P<sub>3</sub> 表示耕地占用税(元/hm<sup>2</sup>);Y 为土地使用年限(a);r 为土地还原率(%),此值取近 5 a 居民消费价格指数变化率的几何平均值与 2022 年末一年期银行定期存款基准利率之和,即“风险调整利率+安全利率”。

2.2 “双碳”视角下的农田生态补偿标准测算方法

“双碳”视角下的农田生态补偿需要计算区域内农作物生长过程中产生的碳排放量与碳吸收量,以计算净碳汇的数据。

2.2.1 农田碳盈亏量的测算

(1) 碳排放量的测算。本文中农田生态系统碳排放来源主要包括农业生产过程中 CO<sub>2</sub> 的排放,以及以 CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> 形式排放后转化为的 CO<sub>2</sub> 排放量。计算公式为:

$$V_C = V_{CO_2} + V_{CH_4} + V_{NO_2} \quad (3)$$

式中:V<sub>C</sub> 为农田生态系统总碳排放量(kg);V<sub>CO<sub>2</sub></sub> 为 CO<sub>2</sub> 排放量(kg);V<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为 CH<sub>4</sub> 形式转换为 CO<sub>2</sub> 的排放量(kg);V<sub>NO<sub>2</sub></sub> 为 NO<sub>2</sub> 形式转换为 CO<sub>2</sub> 的排放量(kg)。

① 计算 CO<sub>2</sub> 排放量的公式为:

$$V_{CO_2} = \sum_{i=1}^n T_i \times VF_i \times (44/12) \quad (4)$$

式中:T<sub>i</sub> 表示第 i 种农田生产投入量;VF<sub>i</sub> 为第 i 种农田生产投入的碳排放系数;44/12 为 CO<sub>2</sub> 和 C 的分子量的比。其中,各类农田生产投入的碳排放系数及其来源见表 1<sup>[25-28]</sup>。

表 1 碳排放系数及资料来源

Table 1 Carbon emission coefficient and reference source

农田投入类型	指标	碳排放系数(VF <sub>i</sub> )	单位(以 C 计)	系数来源
化肥	农用化肥施用折纯量	0.895 6	kg/kg	胡永浩等 <sup>[25]</sup>
农膜	农膜使用量	5.18	kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所 <sup>[26]</sup> (IREEA)
灌溉	农田有效灌溉面积	266.48	kg/hm <sup>2</sup>	美国橡树岭国家实验室 <sup>[27]</sup> (ORNL)
翻耕	农作物播种的面积	312.6	kg/hm <sup>2</sup>	中国农业大学生物与技术学院 <sup>[28]</sup> (LACAV)
农业机械	农用机械总动力	0.18	kg/kw	美国橡树岭国家实验室 <sup>[27]</sup> (ORNL)

②计算 CH<sub>4</sub> 排放量的公式为:

$$V_{\text{CH}_4} = \sum_{j=1}^n \text{AD}_j \times \text{VF}_j \times 25 \quad (5)$$

式中:AD<sub>j</sub> 为第 j 种稻田类型的种植面积 (hm<sup>2</sup>); VF<sub>j</sub> 为稻田 CH<sub>4</sub> 排放因子 (kg/hm<sup>2</sup>), 各区域稻田 CH<sub>4</sub> 排放因子取自《省级温室气体清单编制指南(试行)》, 其中河南省、山东省均为单季稻, 具体系数见表 2; 25 为 CH<sub>4</sub> 转换为 CO<sub>2</sub> 的当量系数。

③计算 N<sub>2</sub>O 排放量的公式为:

$$V_{\text{N}_2\text{O}} = (V_z + V_j) \times (44/28) \times 298 \quad (6)$$

式中:V<sub>z</sub> 和 V<sub>j</sub> 分别为氧化亚氮的直接排放量(kg)和间接排放量(kg); 44/28 为 NO<sub>2</sub> 和 C 的分子量的比; 298 为 NO<sub>2</sub> 转换为 CO<sub>2</sub> 的当量。

其中,V<sub>z</sub> 的计算方式为:

$$V_z = (N_h + N_g) \times \text{VF}_z \quad (7)$$

式中:N<sub>h</sub> 表示施用化肥中的含氮量(kg), 包括氮肥和复合肥中的氮(按照化肥施用折纯量的 1/3 计算<sup>[29]</sup>); VF<sub>z</sub> 表示 N<sub>2</sub>O 的直接排放因子(见表 2); N<sub>g</sub> 为在秸秆还田时产生的氮总量(kg), 计算方法为:

$$N_g = \sum_{m=1}^n [(O_m/E_m - O_m) \times B_m \times L_m + O_m/E_m \times A_m \times L_m] \quad (8)$$

式中:O<sub>m</sub> 为第 m 种作物的籽粒产量(kg), 主要农作物包括稻谷、小麦、玉米、大豆、薯类、棉花、油菜籽、花生、蔬菜; E<sub>m</sub>, L<sub>m</sub>, A<sub>m</sub> 分别为经济系数、秸秆含氮率、根冠比; B<sub>m</sub> 为秸秆还田率。参照《省级温室气体清

单编写指南(试行)》和文献[30], 具体系数见表 3。

V<sub>j</sub> 的计算公式为:

$$V_j = (N_h + N_g) \times 0.0025 \quad (9)$$

(2) 碳吸收量的测算。农田生态系统中的碳吸收主要是通过农作物进行光合作用吸收大气中的二氧化碳实现的。碳的吸收量(C<sub>xs</sub>)的计算公式为:

$$C_{xs} = \sum_{m=1}^n C_a = \sum_{m=1}^n [(O_m \times C_m \times (1 - W_m) \times (1 + A_m))] / E_m \quad (10)$$

式中:C<sub>a</sub> 为第 m 种作物生长过程中的碳吸收量(t); C<sub>m</sub> 为第 m 种作物的碳吸收率; W<sub>m</sub> 为第 m 种作物的含水率。借鉴文献[31], 相关系数取值见表 3。

表 2 各省区稻田甲烷、农用地氧化亚氮直接排放因子  
Table 2 Direct emission factors of methane in paddy fields and nitrous oxide in agricultural land in each province

省区	稻田 CH <sub>4</sub> 排放因子 (VF <sub>j</sub> )/(kg·hm <sup>-2</sup> )	农用地 NO <sub>2</sub> 直接排放因子(VF <sub>z</sub> )/(kg·kg <sup>-1</sup> , 以 N <sub>2</sub> O-N/N 输入量计)
青海	231.2	0.005 6
甘肃	231.2	0.005 6
宁夏	231.2	0.005 6
内蒙古	234.0	0.005 6
山西	234.0	0.005 6
陕西	231.2	0.005 6
河南	236.7	0.005 7
山东	215.5	0.005 7

表 3 主要农作物相关系数

Table 3 Correlation coefficient of major crops

作物	经济系数(E <sub>m</sub> )	秸秆含氮率(L <sub>m</sub> )	根冠比(A <sub>m</sub> )	秸秆还田率(B <sub>m</sub> )	碳吸收率(C <sub>m</sub> )	含水率(W <sub>m</sub> )
稻谷	0.489	0.007 53	0.125	0.300	0.414	0.145
小麦	0.434	0.005 16	0.166	0.450	0.485	0.130
玉米	0.438	0.005 80	0.170	0.200	0.471	0.140
大豆	0.425	0.018 10	0.130	0.800	0.450	0.140
薯类	0.667	0.011 00	0.050	0.000	0.423	0.550
棉花	0.383	0.005 48	0.200	0.000	0.450	0.170
油菜籽	0.271	0.005 48	0.150	0.400	0.450	0.180
花生	0.556	0.018 20	0.200	0.900	0.450	0.100
蔬菜	0.830	0.008 00	0.250	0.038	0.450	0.850

(3) 农田碳盈亏量的测算。

$$N_c = C_{xs} - V_c \quad (11)$$

式中:N<sub>c</sub> 是碳盈亏量(t); C<sub>xs</sub> 是碳的吸收量(t); V<sub>c</sub> 是碳的排放量(t)。

2.2.2 “双碳”视角下农田生态补偿标准的测算

$$S_c = P_c = P_i / T \quad (12)$$

式中:S<sub>c</sub> 是“双碳”视角下区域内农田生态补偿标准(元/t); P<sub>c</sub> 是碳交易平均价格(元/t); T 是碳排放配额累计成交量(t); P<sub>i</sub> 是碳排放配额累计成交额(元)。

## 2.3 数据来源

各市的农田实际存量来自于第三次全国国土调查数据结果; 各市区域常住人口数、粮食产量、农作物播种面积、粮食作物面积数据、农业生产投入量、农药使用量、化肥使用量分别来源于《青海统计年鉴 2022》《宁夏统计年鉴 2022》《内蒙古统计年鉴 2022》《山西统计年鉴 2022》《山西统计年鉴 2022》《河南统计年鉴 2022》《山东统计年鉴 2022》。粮食产量除以区域常住人口数可算出人均粮食消费量。2021 年国

有建设用地出让情况,包括出让面积、出让成交价款与国有建设用地供应结构,来源于《2022 中国自然资源统计公报》;由《中华人民共和国耕地占用税法》中对各省、自治区、直辖市耕地占用税平均税额做出的规定计算出各市耕地占用税。安全利率取中国人民银行对金融机构人民币存款基准利率中一年期银行存款利率的现行规定。2021 年中国碳排放累计成交量与成交额来源于中国碳排放交易网。由于受到数据可获得性的局限,本文中部分数据是根据近 3 a 同一指标运用插值法进行补齐。

### 3 结果与分析

#### 3.1 粮食安全视角下的农田生态补偿计算结果

3.1.1 粮食安全视角下的各市农田盈亏量 由于黄河流域的 9 个省份均属于粮食主产区和产销平衡区<sup>[32]</sup>,故粮食自给率取 100%。而人均粮食消费量参考世界粮食组织的数据取 400 kg/人<sup>[33]</sup>。在黄河流经的 60 个市中,只有流经宁夏回族自治区的 5 个市全部处于农田盈余状态,其余各省均存在不同程度的农田赤字情况。处于农田盈余状态的市有 43 个,农田盈余量最大的 5 个市是分别是巴彦淖尔、乌兰察布、榆林、定西以及鄂尔多斯市,榆林、乌兰察布、巴彦淖尔与定西也是 60 个市中农田实际存量最多的 4 个市,巴彦淖尔、乌兰察布、鄂尔多斯属于内蒙古是粮食主产区,且 5 个市均位于流域的中上游,农业生产自然条件良好,地广人稀,能提供足够的粮食耕地;处于农田赤字状况的市有 17 个,赤字状况最严重的 5 个市分别是郑州、西安、太原、青岛、兰州市。这 5 个市中有 4 个为该省省会城市,城镇化与工业化程度较高,且西安、郑州、青岛是常住人口数量最多的 3 个市,粮食作物耕种面积稀少(图 2)。

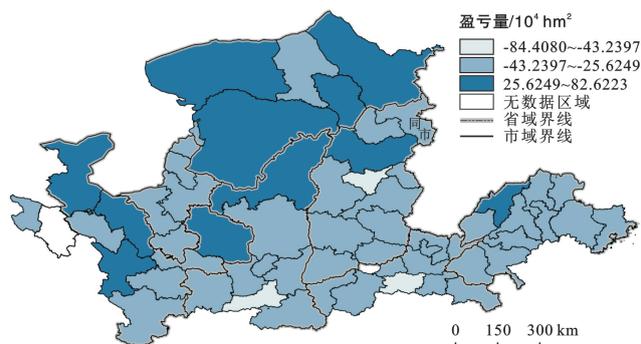


图 2 粮食安全视角下黄河流域各市农田盈亏量空间分布  
Fig.2 Spatial distribution of farmland surplus and deficit at different prefecture-level cities in Yellow River basin from perspective of food security

3.1.2 粮食安全视角下的农田生态补偿标准 由《2022 年中国自然资源统计公报》可得 2021 年全年

出让国有建设用地  $3.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 出让成交价款  $7.72 \times 10^{12}$  元,可得出让合同单价为  $2.51 \times 10^3$  元/ $\text{m}^2$ ,根据 2005—2022 年的《中国国土资源公报》《中国自然资源统计公报》等资料,各年土地出让净收益占土地出让总价款的比例为 19%~21%,由此取土地出让净收益占土地出让总价款的比例为 20%,即可得出土地出让金纯收益为  $5.02 \times 10^2$  元/ $\text{m}^2$ ;2017—2021 年全国居民消费价格指数变化率取几何均值为 1.74%,2021 年末中国人民银行对金融机构人民币存款基准利率中一年期银行存款利率为 1.5%,相加得出土地还原率为 3.24%;耕地转为建设用地的价格水平接近于建制镇,包括建制镇在内的城镇城乡交错带平均地价水平约为各市水平的  $1/9$ <sup>[34]</sup>,《中华人民共和国契税法》中规定的契税税率为 3%,2021 年全国主要监测市综合地价为  $4.64 \times 10^3$  元/ $\text{m}^2$ ,可得土地使用权出让契税为 13.39 元/ $\text{m}^2$ ;由《中华人民共和国耕地占用税法》算得全国耕地占用税平均税额为 27.50 元/ $\text{m}^2$ ;2021 年国有建设用地供应结构为工矿仓储用地 26.51%、商服用地 5.66%、住宅用地 18.44%、基础设施及其他用地 49.40%,根据《中华人民共和国城镇国有土地使用权出让和转让暂行条例》中对各种用途的土地出让权出让最高年限的规定,对土地使用年期进行计算的加权平均年限为 50.86 年。即可算出粮食安全视角下的农田生态补偿标准为 11.006 2 元/ $\text{m}^2$ 。

#### 3.2 “双碳”视角下的农田生态补偿计算结果

3.2.1 “双碳”视角下的各市碳盈亏量 由计算的碳盈亏量可知(图 3),黄河流域 60 个市区中碳吸收量大于碳排放量属于碳盈余的市主要集中在山东、河南、青海,宁夏、陕西的碳吸收量普遍小于碳排放量属于碳赤字。出现碳盈余的市区共有 39 个,碳盈余量最大的 5 个市分别是德州、菏泽、聊城、商丘、济宁,均位于华北平原,以农业为主要的业态,光、热、水分条件好,植被多呈现碳汇作用;出现碳赤字的共有 21 个市,碳赤字量最大的 5 个市分别是巴彦淖尔、石嘴山、中卫、渭南、吴忠市,巴彦淖尔、渭南市的化肥施用量很高,石嘴山、中卫、吴忠市的煤炭、矿产资源丰富,这些都会增加碳排放强度。

3.2.2 “双碳”视角下补偿标准的测算 中国 2021 年碳排放额度累计成交量  $1.79 \times 10^8$  t,累计成交额  $7.66 \times 10^9$  元,则 2021 年中国碳交易平均价格为 42.798 9 元/t,由此算出各市的碳汇效益。

#### 3.3 粮食安全与“双碳”视角下的各市农田生态补偿支付/受偿额度

粮食安全关乎国家安全,而其离不开农业生产,作为主要的碳排放源,农业领域早日达到“双碳”的目

标至关重要。而且粮食增产和农田固碳存在效应互利、技术协同,两目标的双赢有助于实现黄河流域的生态保护与高质量发展。在粮食安全与“双碳”视角下,黄河流域的 60 个市中,接受补偿的市共有 43 个,额度最大的 5 个市分别是巴彦淖尔、乌兰察布、榆林、定西、鄂尔多斯市,这些市农田现存面积都较大,且农业生产现代化程度较高。

需要额外支付补偿的市有 17 个,其中额度最大的 5 个市分别是郑州、西安、太原、青岛、兰州市,这些市城镇化与工业化程度较高,经济较为发达,农田保护的问题也更需要引起各级政府部门及农户的重视(表 4)。

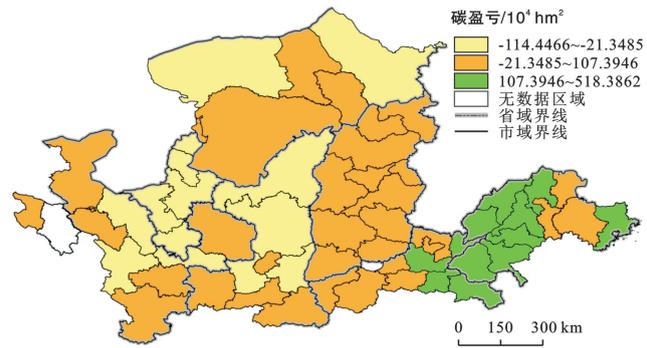


图 3 “双碳”视角下黄河流域各市碳盈亏空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of carbon surplus and deficit at different prefecture-level cities in Yellow River basin from perspective of “dual carbon”

表 4 黄河流域各市粮食安全与“双碳”视角下的农田生态补偿额度

Table 4 Compensation amount of farmland farmers from perspective of food security and “dual carbon” at different prefecture-level cities in Yellow River basin

10<sup>8</sup>元

市名	农田生态补偿额度			市名	农田生态补偿额度		
	粮食安全视角	“双碳”视角	双视角		粮食安全视角	“双碳”视角	双视角
西宁	-169.77	0.04	-169.73	延安	69.25	-0.19	69.06
陇南	257.63	-0.01	257.62	铜川	28.85	-0.01	28.84
兰州	-205.56	-0.06	-205.62	渭南	12.11	-0.30	11.82
定西	629.33	-0.19	629.15	宝鸡	0.66	-0.05	0.61
白银	402.97	-0.18	402.79	西安	-872.54	-0.04	-872.58
武威	400.43	0.10	400.53	咸阳	-30.06	-0.26	-30.32
中卫	237.27	-0.32	236.95	商洛	-142.25	-0.01	-142.26
固原	229.56	-0.28	229.28	天水	160.09	0.14	160.23
吴忠	230.22	-0.28	229.93	平凉	179.90	-0.09	179.81
银川	6.83	-0.25	6.57	庆阳	445.57	0.01	445.58
石嘴山	77.29	-0.33	76.96	三门峡	-44.48	0.04	-44.44
乌海	-22.35	0.00	-22.35	洛阳	-162.18	0.37	-161.81
巴彦淖尔	909.65	-0.49	909.16	焦作	-28.52	0.34	-28.18
包头	266.88	0.14	267.02	郑州	-929.35	0.10	-929.26
鄂尔多斯	509.10	0.05	509.15	新乡	46.46	0.83	47.29
呼和浩特	326.67	0.00	326.67	鹤壁	-5.95	0.17	-5.78
乌兰察布	832.58	-0.23	832.34	开封	77.51	0.63	78.14
大同	123.86	0.01	123.88	安阳	19.93	0.33	20.26
朔州	282.08	0.11	282.19	濮阳	33.47	0.82	34.29
忻州	440.84	0.00	440.84	商丘	239.80	1.37	241.17
太原	-476.07	-0.02	-476.09	菏泽	267.98	1.94	269.92
阳泉	-45.03	0.04	-44.99	济宁	130.25	0.94	131.19
晋中	142.69	0.25	142.94	聊城	190.58	1.43	192.01
吕梁	73.55	0.02	73.57	泰安	54.06	0.64	54.70
长治	118.25	0.13	118.38	济南	-126.17	0.66	-125.51
临汾	118.91	0.29	119.20	德州	362.12	2.22	364.34
晋城	-23.12	0.00	-23.12	淄博	-136.52	0.35	-136.17
运城	34.68	0.29	34.97	滨州	156.78	0.86	157.65
榆林	633.52	-0.16	633.35	东营	72.34	0.18	72.52
潍坊	82.58	0.46	83.03	青岛	-212.93	0.70	-212.25

## 4 结论

(1) 粮食安全视角下的农田生态补偿标准是  $11.0062 \text{ 元/hm}^2$ , 处于农田盈余状态的市有 43 个, 巴彦淖尔市的农田盈余量最大, 为  $8.26 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ; 处于农田赤字状态的市有 17 个, 郑州市的农田赤字状况最严重的, 为  $-8.44 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。

(2) 双碳目标视角下的农田生态补偿标准为  $42.8 \text{ 元/t}$ , 处于碳盈余状态的市共有 39 个, 碳盈余量最大的市是德州市, 为  $5.18 \times 10^6 \text{ t}$ ; 处于碳赤字状态的市共有 21 个, 碳赤字量最大的市是巴彦淖尔市, 为  $-1.14 \times 10^6 \text{ t}$ 。

(3) 粮食安全与“双碳”视角下接受补偿的市有 43 个, 额度最大的市是巴彦淖尔市, 为  $9.09 \times 10^{10} \text{ 元}$ ; 需要支付的市有 17 个, 额度最大的市是郑州市, 为  $-9.29 \times 10^{10} \text{ 元}$ 。

## 5 建议

本文计算了黄河流域 60 个地级市在粮食安全视角下的农田盈亏量与双碳视角下的碳盈亏量, 基于机会成本法与当年碳交易市场的碳交易平均价格分别建立补偿机制, 来计算农田生态补偿额度。结果表明: 以农业生产为主的市往往接受补偿的额度较高, 而城镇化与工业化程度高的市支付补偿的额度较高。农田生态补偿体系的建立受到全国以及当地的经济状况、社会环境、居民生活等多方面影响, 未来仍需结合实际进行多方面的研究, 也需探析如何平衡农田不同的功能性, 及探讨研究结论对全国其他流域的适用性。

结合本文粮食安全与双碳目标下黄河流域农田生态补偿研究, 对农田未来发展提出如下建议: 制度上, 创新推进发展生态综合补偿模式, 针对不同地区的发展差异, 制定因地制宜的生态补偿相关管理政策, 在耕地生态保护的基础上发展当地特色农业产业, 进而提升地区的经济效益水平。技术上, 数字化治理赋能多目标约束下的生态补偿机制, 依托数字孪生、区块链等数字技术, 健全从粮食生产、销售、补偿等全链条一体化监管平台, 为多重补偿目标的设计实现与反馈调整提供了可能性。思想上, 大力推广低碳农业高质量发展理念, 采用多种方法向群众进行宣传教育, 让农户理解农田的多功能性认可其社会与生态价值的同等重要性, 引领传统农业向低碳靠近, 更好保障生态产品价值的实现。

## 参考文献 (References)

[1] 韩杨, 陈雨生, 陈志敏. 中国高标准农田建设进展与政策

完善建议: 对照中国农业现代化目标与对比美国、德国、日本经验教训[J]. 农村经济, 2022(5): 20-29.

Han Yang, Chen Yusheng, Chen Zhimin. Progress in the construction of high-standard farmland in China and suggestions for policy improvement: Comparing China's agricultural modernization goals with the experiences and lessons of the United States, Germany and Japan [J]. Rural Economy, 2022(5): 20-29

[2] 苗长虹, 张佰发. 黄河流域高质量发展分区分级分类调控策略研究[J]. 经济地理, 2021, 41(10): 143-153.

Miao Changhong, Zhang Baifa. Regulation strategy of zoning-gradation-classification for high-quality development in the Yellow River basin [J]. Economic Geography, 2021, 41(10): 143-153.

[3] 袁婉潼, 乔丹, 柯水发, 等. 资源机会成本视角下如何健全生态补偿机制: 以国有林区停伐补偿中的福利倒挂问题为例[J]. 中国农村观察, 2022(2): 59-78.

Yuan Wantong, Qiao Dan, Ke Shuifa, et al. How to improve ecological compensation mechanism from the perspective of resource opportunity Cost?: A case study based on "welfare upside down" of forest resources compensation in state-owned forest areas [J]. China Rural Survey, 2022(2): 59-78.

[4] Wang W, Wu F P, Yu H. Optimal design of the ecological compensation mechanism in transboundary river basins under the Belt and Road Initiative [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 32: 173-183.

[5] 曹港程, 沈金生. 海洋牧场碳汇资源生态补偿标准[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3153-3166.

Cao Gangcheng, Shen Jinsheng. Ecological compensation standards of carbon sink resources in the marine ranch [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(12): 3153-3166.

[6] Wang Yubing, Zhu Kai, Xiong Xiao, et al. Assessment of the ecological compensation standards for cross-basin water diversion projects from the perspective of main headwater and receiver areas [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 20(1): 717.

[7] 赵晶晶, 葛颜祥, 李颖. 公平感知、社会信任与流域生态补偿的公众参与行为[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(6): 196-205.

Zhao Jingjing, Ge Yanxiang, Li Ying. Fairness perception, social trust, and public participation in watershed eco-compensation [J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(6): 196-205.

[8] Li Gen, Sun Fengyun, Fu Bitian, et al. How to promote the public participation in eco-compensation in transboundary river basins: A case from planned behavior perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,

- 313(2):127911.
- [9] 吴风平, 邵志颖, 季英雯. 新安江流域横向生态补偿政策的减排和绿色发展效应研究[J]. 软科学, 2022, 36(9): 65-71.  
Wu Fengping, Shao Zhiying, Ji Yingwen. Research on emission reduction and green development effect of horizontal ecological compensation policy in Xin'anjiang River basin [J]. Soft Science, 2022, 36(9): 65-71.
- [10] Zheng Qiaoqiao, Wan Liang, Wang Shanyong, et al. Does ecological compensation have a spillover effect on industrial structure upgrading?: Evidence from China based on a multi-stage dynamic DID approach [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 294: 112934.
- [11] 张仕超, 刘竞宇, 冉龙池, 等. 基于提高森林覆盖率目标的跨区县横向生态补偿与供需对接: 以重庆市为例[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4651-4663.  
Zhang Shichao, Liu Jingyu, Ran Longchi, et al. Cross-county horizontal ecological compensation and supply-demand docking to increase forest coverage: A case study of Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4651-4663.
- [12] 庞洁, 徐珂, 靳乐山. 湿地生态补偿对农户生计策略和收入的影响研究: 以鄱阳湖区调研数据为例[J]. 中国土地科学, 2021, 35(4): 72-80.  
Pang Jie, Xu Ke, Jin Leshan. Research on the impact of wetland eco-compensation on farmers' livelihood strategies and income: An empirical analysis of Poyang Lake [J]. China Land Science, 2021, 35(4): 72-80.
- [13] 李璐, 夏秋月, 董捷, 等. 武汉城市圈县域空间横向碳生态补偿研究: 基于土地利用碳收支差异[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2627-2639.  
Li Lu, Xia Qiuyue, Dong Jie, et al. County-level carbon ecological compensation of Wuhan urban agglomeration under carbon neutrality target: Based on the difference in land use carbon budget [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2627-2639.
- [14] 崔宁波, 生世玉, 方袁意如. 粮食安全视角下省际耕地生态补偿的标准量化与机制构建[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(11): 232-243.  
Cui Ningbo, Sheng Shiyu, Fang Y. Standard quantification and mechanism construction of inter-provincial cultivated land ecological compensation from the perspective of food security [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(11): 232-243.
- [15] 刘利花, 张丙昕, 刘向华. 粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 252-263.  
Liu Lihua, Zhang Bingxin, Liu Xianghua. Compensation of provincial cultivated land protection in China from the dual perspectives of food security and ecological security [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 252-263.
- [16] 靳亚亚, 赵凯, 肖桂春. 陕西省耕地保护经济补偿分区研究: 基于粮食安全与生态安全双重视角[J]. 中国土地科学, 2015, 29(10): 12-19.  
Jin Yaya, Zhao Kai, Xiao Guichun. The economic compensation zoning of the cultivated land protection in Shaanxi Province: From the perspective of food and ecological security [J]. China Land Sciences, 2015, 29(10): 12-19.
- [17] 张卫建, 严圣吉, 张俊, 等. 国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略[J]. 中国农业科学, 2021, 54(18): 3892-3902.  
Zhang Weijian, Yan Shengji, Zhang Jun, et al. Win-win strategy for national food security and agricultural double-carbon goals [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(18): 3892-3902.
- [18] 黄晓敏, 陈长青, 陈铭洲, 等. 2004—2013年东北三省主要粮食作物生产碳足迹[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3307-3315.  
Huang Xiaomin, Chen Changqing, Chen Mingzhou, et al. Carbon footprints of major staple grain crops production in three provinces of Northeast China during 2004—2013 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3307-3315.
- [19] 耿翔燕, 李文轩. 中国流域生态补偿研究热点及趋势展望[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2153-2163.  
Geng Xiangyan, Li Wenxuan. Hotspots and trends of watershed ecological compensation research in China [J]. Resources Science, 2022, 44(10): 2153-2163.
- [20] 单云慧. 新时代生态补偿横向转移支付制度化发展研究: 以卡尔多—希克斯改进理论为分析进路[J]. 经济问题, 2021(2): 107-116.  
Shan Yunhui. The study on horizontal transfer payment institutionalization development of ecological compensation in the new era: Based on the theory of Kaldor-Hicks efficiency [J]. On Economic Problems, 2021(2): 107-116.
- [21] 史歌. 高质量发展背景下黄河流域生态补偿机制的建设思路[J]. 经济与管理评论, 2023, 39(2): 49-58.  
Shi Ge. The construction idea of ecological compensation mechanism in the Yellow River basin under the background of high-quality development [J]. Review of Economy and Management, 2023, 39(2): 49-58.
- [22] 薛建春. 新一轮退耕还林还草工程对土地利用效率的影响: 基于黄河流域的实证研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 155-164.

- Xue Jianchun. Impacts of a new round of returning farmland to forests and grasslands project on land use efficiency: Empirical study in Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(6): 155-164.
- [23] 宁静, 杨楠, 杜国明, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空演变研究: 以黑龙江省为例[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(6): 98-112.
- Ning Jing, Yang Nan, Du Guoming, et al. Spatial-temporal evolution of carbon footprint of farmland ecosystem: A case study of Heilongjiang Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(6): 98-112.
- [24] 张治会, 李全新. 基于机会成本损失的区际地方政府耕地保护补偿研究: 以安徽省各市域为例[J]. *管理现代化*, 2017, 37(1): 33-35.
- Zhang Zhihui, Li Quanxin. Study on the compensation of cultivated land protection by inter-regional local governments based on opportunity cost loss: Taking cities in Anhui Province as examples [J]. *Modernization of Management*, 2017, 37(1): 33-35.
- [25] 胡永浩, 张昆扬, 胡南燕, 等. 中国农业碳排放测算研究综述[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(2): 163-176.
- Hu Yonghao, Zhang Kunyang, Hu Nanyan, et al. Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2023, 31(2): 163-176.
- [26] 王莉, 刘莹莹, 张亚慧, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(12): 410-422.
- Wang Li, Liu Yingying, Zhang Yahui, et al. Spatial and temporal distribution of carbon source/sink and decomposition of influencing factors in farmland ecosystem in Henan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(12): 410-422.
- [27] 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 & Environment*, 2002, 91(1/2/3): 217-232.
- [28] 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[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [29] 雍新琴, 张安录. 基于机会成本的耕地保护农户经济补偿标准探讨: 以江苏铜山县小张家村为例[J]. *农业现代化研究*, 2011, 32(5): 606-610.
- Yong Xinqin, Zhang Anlu. Study on economic compensation standard for peasant households in cultivated land preservation based on opportunity cost [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(5): 606-610.
- [30] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N<sub>2</sub>O 排放量重新估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 7-13.
- Zhang Qiang, Ju Xiaotang, Zhang Fusuo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC 2006 guideline method [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2010, 18(1): 7-13.
- [31] 翁翎燕, 李伟霄, 张梅, 等. 江苏省农田生态系统净碳汇时空演变特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(7): 1584-1594.
- Weng Lingyan, Li Weixiao, Zhang Mei, et al. Spatial-temporal evolution of net carbon sink of farmland ecosystem in Jiangsu Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(7): 1584-1594.
- [32] 马林静, 王雅鹏, 吴娟. 中国粮食生产技术效率的空间非均衡与收敛性分析[J]. *农业技术经济*, 2015(4): 4-12.
- Ma Linjing, Wang Yapeng, Wu Juan. Spatial disequilibrium and convergence analysis of technical efficiency of grain production in China [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(4): 4-12.
- [33] 杨欣, 蔡银莺, 张安录. 农田生态补偿横向财政转移支付额度研究: 基于选择实验法的生态外溢视角[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 368-375.
- Yang Xin, Cai Yinying, Zhang Anlu. Estimation of farmland eco-compensation horizontal transferring payment amount in Wuhan metropolitan area: From the perspective of spillover ecological value measured by choice experiment [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 368-375.
- [34] 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.
- Zhang Guangsheng, Wang Shanshan. China's agricultural carbon emission: Structure, efficiency and its determinants [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2014, 35(7): 18-26.