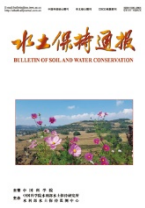

水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：　宁夏沿黄城市带耕地碳排放时空特征和生态效率评价
作者：　陈进，陶恩泽，陶红，何浩亮，高礼
DOI：　10.13961/j.cnki.stbctb.20240523.001
收稿日期：　2023-10-09
网络首发日期：　2024-05-24
引用格式：　陈进，陶恩泽，陶红，何浩亮，高礼．宁夏沿黄城市带耕地碳排放时空特征和生态效率评价[J/OL]．水土保持通报．https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240523.001

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：10.13961/j.cnki.stbctb.20240523.001　网络首发时间：2024-05-24 14:10:09
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.X.20240523.0851.002

宁夏沿黄城市带耕地碳排放时空特征和生态效率评价

陈 进[1]，陶恩泽[2]，陶 红[1,3]，何浩亮[1]，高 礼[1,3]
〔1.宁夏大学 地理科学与规划学院，宁夏 银川 750021；2.平罗县生态环境监测站，宁夏 石嘴山，753000；3.宁夏(中阿)旱区资源评价与环境调控重点实验室，宁夏 银川 750021〕

摘　要：[目的] 研究宁夏回族自治区沿黄城市带 2011—2020 年耕地碳排放时空变化规律，评价生态效率，为构建低碳农业模式，推动农业碳减排，促进地区农业高质量发展提供支撑。[方法] 采用耕地碳排放估算模型和 ArcGIS 计算分析宁夏沿黄城市带耕地碳排放的时空特征，采用非期望产出超效率模型(SBM)评估耕地生态效率值。[结果] ①2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地碳排放总量总体呈下降趋势，化肥和农用柴油是耕地碳排放的主要来源。②宁夏沿黄城市带耕地碳排放呈现南北高，中间低的空间分布格局，其中平罗县和中宁县是最大的耕地碳排放城市。③宁夏沿黄城市带耕地碳排放强度呈先升高后下降的趋势与耕地碳排放总量变化相似。④宁夏沿黄城市带耕地利用生态效率总体呈波动状态，利通区耕地生态效率较低，需要调整农业生产过程中的投入要素。[结论] 宁夏回族自治区沿黄城市带耕地碳排放时空分布不均匀，且生态效率不稳定，还需要进一步探索和巩固减排措施。

关键词：宁夏沿黄城市带；耕地碳排放；非期望产出 SBM 超效率模型；生态效率
文献标识码：A　　**中图分类号：**K903

文献参数：陈进，陶恩泽，陶红，等.宁夏沿黄城市带耕地碳排放时空特征和生态效率评价[J].水土保持通报，2024，44(3)　. Chen Jin，Tao EnZe，Tao Hong，et al. Spatiotemporal characteristics of carbon emissions and eco-efficiency evaluation of cultivated land for urban belt along Yellow River in Ningxia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(3)　.

Spatiotemporal Characteristics of Carbon Emissions and Eco-efficiency Evaluation of Cultivated Land for Urban Belt Along Yellow River in Ningxia

Chen Jin[1]，Tao Enze[2]，Tao Hong[1,3]，He Haoliang[1]，Gao Li[1,3]
〔1.*School of Geography and Planning*，*Ningxia University*，*Yinchuan*，*Ningxia* 750021，*China*；2.*Pingluo County Ecological Environment Monitoring Station*，*Shizuishan*，*Ningxia* 753000，*China*；3.*Key Laboratory* (*China-Arab*) *of Resource Evaluation and Environmental Regulation of Arid Region in Ningxia*，*Yinchuan*，*Ningxia* 750021，*China*〕

Abstract：[Objective] The spatial-temporal variation of carbon emissions from cultivated land for the urban belt along the Yellow River in the Ningxia Hui Autonomous Region from 2011 to 2020 was analyzed，and the ecological efficiency was evaluated in order to provide support for the construction of a low-carbon agricultural model，the promotion of agricultural carbon emission reduction，and the promotion of high-quality agricultural development in the region. [Methods] A model to estimate carbon emission from cultivated land and ArcGIS calculations were used to analyze the temporal and spatial characteristics of carbon emissions from cultivated land in the urban belt along the Yellow River in Ningxia. The unexpected output super-efficiency model (SBM) was used to evaluate the ecological efficiency of cultivated land. [Results] ① Total carbon emissions from cultivated land in the urban belt along the Yellow River in Ningxia

收稿日期：2023-10-09　　**修回日期：**2023-12-11
资助项目：宁夏回族自治区重点研发计划项目“多环芳烃污染农田土壤强化微生物修复关键技术研究与示范”(2021BEG0313)；宁夏回族自治区重点研发计划项目“改性粉煤灰去除水中氮磷的研究”(2020BEB04008)；宁夏回族自治区自然科学基金项目(2021AAC03009，2020AAC03054)
第一作者：陈进(1995—)，男(汉族)，安徽省合肥市人，硕士研究生，研究方向为新兴污染物生物修复。Email：2502125537@qq.com。
通信作者：陶红(1978—)，女(回族)，宁夏回族自治区石嘴山市人，硕士，讲师，主要从事新兴污染物生物修复研究。Email：ayy06@163.com。

showed an overall downward trend from 2011 to 2020. Chemical fertilizer and agricultural diesel were the primary sources of carbon emission from cultivated land. ② Carbon emissions from cultivated land in the urban belt along the Yellow River in Ningxia showed a spatial distribution pattern of high in the north and south and low in the middle. Pingluo and Zhongning County were the largest cultivated land carbon emission cities. ③ The trend of carbon emission intensity of cultivated land in the urban belt along the Yellow River in Ningxia was similar to that of cultivated land. ④ The ecological efficiency of cultivated land use in the urban belt along the Yellow River in Ningxia fluctuated in general, and the ecological efficiency of cultivated land in the Litong area was low. Therefore, it is necessary to adjust the input factors in the agricultural production process. [Conclusion] The spatial and temporal distribution of carbon emissions from arable land in the urban belt in Ningxia Hui Autonomous Region is uneven, and the eco-efficiency could be unstable. Further exploration and consolidation of emission reduction measures are needed.

Keywords: urban belt along the Yellow River in Ningxia; carbon emissions of cultivated land; unexpected output super-efficiency model (SBM); ecological efficiency

温室气体的大量排放导致全球气候变暖,进而引起诸如能源紧张、降水结构变化、土地荒漠化和农业减产等诸多危及全人类及后代生存的问题,减少二氧化碳等温室气体的排放已成为各国共识。农业生产活动是温室气体人为排放的主要来源之一,全球约 1/5 的温室气体来源于农业生产活动[1]。根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》,2014 年中国农业活动产生的温室气体排放量为 8.30×10^8 t 二氧化碳排放当量,是中国温室气体的第三大排放源[2]。为积极应对气候变化,2021 年中国在 75 届联合国大会上提出了“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”目标,开展农地利用碳排放研究是实现这一目标的重要途径之一。

目前关于耕地碳排放的研究主要集中在指标体系构建[3-5]、碳排放系数研究[6-9]、区域碳排放预测[10-11]、碳排放空间分析研究[12-14]以及耕地利用效率评价[15-19]等几方面,农地利用方式变化及空间差异研究、农地碳排放特征趋势及脱钩效应研究也逐渐成为新的研究热点。但从研究内容上看,现有文献多聚焦于碳排放动态变化和预测,以生态视角对耕地利用效率研究较少;研究指标侧重从农业物质投入、农田土壤利用、畜牧业养殖 3 类进行测算,关注农业耕地碳排放的较少;研究区域以中、东部地区的区域、流域、省级行政单元为评价单元的大尺度范围[20]研究较多,对西北地区关注较少,特别是县级尺度的研究较匮乏;另外,耕地利用效率测算的方法多种多样,包括数据包络分析(DEA)[21]、随机前沿函数(SFA)[22]、基于松弛值测算的模型(SBM)[23]模型等,虽然数据包络方法(DEA)具有所需指标少、保存原始信息完整等特点[24]在效率分析中应用较为广泛,但由于其在投入—产出计算过程中并未考虑实际生产过程中的非理想目标如:资源消耗、污染物的排放等因素,导致测算结果的精确性产生偏差。非期望产出 SBM 超效率模型的优势在于将松弛变量引入 DEA 目标函数中,能够有效解决传统 DEA 模型在效率评价中的偏差问题,并且兼顾非期望产出因素所带来的影响,优化投入产出的松弛测度,可以更为客观、综合地反映地区的生态经济效率[25]。

综上,相关学者对区域碳排放及其影响因素等内容已进行了大量研究,但聚焦于西北地区特别是县域尺度,同时关注耕地碳排放、生态效率等内容的研究鲜有涉及,有待进一步完善。宁夏沿黄城市带是宁夏重要的经济发展中心,同时也是重要的产粮区,区域贡献 GDP 约占宁夏全境 GDP 的 2/3 以上,粮食产量约为宁夏总粮食产量 1/2 以上。2022 年,国家发展改革委印发《支持宁夏建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区实施方案》,研究宁夏沿黄城市带农业绿色发展状况,清晰县域尺度耕地碳排放差异及影响因素,对促进宁夏高质量发展,更好实现控碳减排具有重大代表意义,同时研究具有碳排放和生态效率的双重视角,一定程度上能够弥补碳排放分析不足,丰富农业低碳发展模式,具有一定的理论和现实意义。基于此,本文以宁夏沿黄城市带为研究范围,运用 ArcGIS 软件和非期望产出 SBM 超效率模型,基于县级尺度,研究其 2011—2020 年间的耕地碳排放时空变化规律,评价生态效率,以期为宁夏沿黄城市带构建低碳农业生产模式,促进农业高质量发展和生态文明建设提供一定理论和数据支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

宁夏沿黄城市带是宁夏回族自治区政府在“引黄灌区”的基础上提出的,该区域位于宁夏西北部

(104°17′—106°39′E，36°06′—39°25′N)，总面积为 28 290.66 km^2，占宁夏总面积的 42.61%，其中耕地面积为 4 678.34 km^2，占宁夏耕地总面积的39.04%。宁夏沿黄城市带地处温带大陆性气候区，农作物熟制为一年一熟，种植的农作物包括玉米、稻谷、薯类和小麦等。据统计，2021 年宁夏沿黄经济带生产总值达到 3.09×10^{12} 元，占全区生产总值总量的 82.42%；人口 4.59×10^{6} 人，占全区总人口总数的 66.02%[26]。

1.2　耕地碳排放体系构建

准确合理的碳排放体系是研究碳排放量的重要前提。本文在相关学者的研究基础上结合宁夏地区的实情，将化肥的生产和使用、农膜的生产和使用、农业机械所消耗的化石燃料(农用柴油)、农药的生产和使用、农业生产用电量和翻耕共 6 个要素作为碳排放源，对耕地的碳排放量进行测算。耕地碳排放计算公式[27-28]如公式(1)，碳排放系数见表 1：

$$E_k=\sum e_i=\sum T_i\times\beta_i \tag{1}$$

式中：E_k 为耕地直接碳排放量(kg)；e_i 为各项生产投入要素的碳排放量(kg)；T_i 为各生产要素的投入量；β_i 是各生产要素的碳排放系数。

表 1　耕地主要的碳排放源和碳排放系数

Table 1　Main carbon emission sources and carbon emission coefficients of cultivated land

排放源	排放系数	数据选取	数据来源
化肥的生产和使用	3.284(kg/kg)	化肥施用量/kg	邱子健等[29]
农膜的生产和使用	18.993(kg/kg)	农用塑料薄膜使用量/kg	邱子健等[29]
农业机械消耗的化石燃料	2.173 2(kg/kg)	农用柴油使用量/kg	李波等[27]
农药的生产和使用	18.092(kg/kg)	农药施用量/kg	邱子健等[29]
农业生产用电量	581(kg/Mwh)	农业生产用电量/Mwh	张金梦[30]
翻 耕	288.93(kg/hm)	农作物播种面积/hm^2	文高辉等[31]

注：农用柴油和农作物播种面积碳排放系数是在参考文献的基础上乘以 44/12 得出(44/12 为 C 当量转化为 CO_2 的转换系数)。

1.3　生态效率评价体系的构建和非期望产出 SBM 超效率模型

生态效率是描述产品和服务生产过程中减少自然资源利用与污染物释放的重要理论，其核心在于降低自然资源消耗与环境影响，提升产品与服务价值及资源循环效用[32]。生态效率的评价模型众多，其中非期望产出 SBM 超效率模型较好的解决了大多数 DEA(包括 CCR)模型在松弛变量、多个有效决策单元间难以区分的问题，因此，本文采用非期望产出 SBM 超效率模型来测算沿黄城市带各市县的耕地生态效率。结合宁夏沿黄城市带的地方实际情况，选取土地、劳动力、农用柴油量、化肥施用量、农药使用量、农膜使用量和农业生产用电量作为非期望产出 SBM 超效率模型的投入要素；选取经济和社会产出作为模型的期望产出要素；碳排放作为模型的非期望产出要素，以此来构建耕地利用生态效率评价体系[31](表 2)。

表 2　耕地生态效率评价体系

Table 2　Evaluation system of cultivated land eco-efficiency

指标类别	变 量	指标名称
投入要素	土 地	农作物播种面积/hm^2
	劳动力	乡村从业人员(人)
	农用柴油	农用柴油使用量/kg
	化 肥	化肥施用量/kg
	农 药	农药使用量/kg
	农 膜	农用塑料薄膜使用量/kg
	用电量	农业生产用电量/MWh
期望产出要素	经济产出	农业产值/10^3元
	社会产出	粮食产量/t
非期望产出要素	碳排放量	耕地碳排放总量/10^3t

假定在耕地利用过程中存在 n 个决策单元(DMU)，每个 DMU 里都有生产投入要素 m 个及 q，h 个期望产出和非期望产出要素。本文研究范围为宁夏沿黄城市带共 13 个市县，故 $n=13$。定义向量 X_o，Y_o，b_o 分别为投入要素、期望产出要素和非期望产出要素，公式(2)为针对宁夏沿黄城市带区域构建的耕地碳排放非期望产出 SBM 超效率模型[33]：

$$\rho=\min\frac{1+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{io}^t}}{1-\frac{1}{q+h}\left(\sum_{r=1}^{q}\frac{s_r^+}{g_{ro}^t}+\sum_{k=1}^{h}\frac{s_k^-}{b_{ko}^t}\right)}$$

$$\begin{cases}\text{s.t.}\,x_{io}^t\geqslant\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1,j\neq0}^{n}\lambda_j^t x_{ij}^t-s_i^- & (i=1,2\cdots m)\\ y_{ro}^t\leqslant\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1,j\neq0}^{n}\lambda_j^t y_{rj}^t+s_r^+ & (r=1,2\cdots q)\\ b_{ko}^t\geqslant\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1,j\neq0}^{n}\lambda_j^t b_{kj}^t-s_k^- & (k=1,2\cdots h)\\ \lambda_j^t,s_i^-,s_r^+,s_k^-\geqslant0\end{cases} \tag{2}$$

式中：ρ 是耕地碳排放效率，当 $\rho\geqslant1$ 表示该城市耕地生态效率达到有效状态；当 $\rho<1$ 表示该城市耕地生态效率处于无效状态[34]。s_i^-，s_r^+，s_k^- 分别为投入要

素、期望产出和非期望产出要素的松弛变量；x_{io}^{t}，y_{ro}^{t}，b_{ko}^{t}分别表示第 o 个 DMU 的第 i 个投入要素、第 r 个期望产出和第 k 个非期望产出要素；$i=1,2\cdots m$；$r=1,2\cdots q$；$k=1,2\cdots h$；为约束条件。

1.4 数据来源

本文中化肥施用量、农用塑料薄膜使用量、农用柴油使用量、农药施用量、农业生产用电量和农作物播种面积等数据均来自同期《银川市统计年鉴》《石嘴山统计年鉴》《吴忠市统计年鉴》《中卫市统计年鉴》。

2 结果与分析

2.1 沿黄城市带耕地碳排放时空特征

2.1.1 碳排放时间变化 2011—2020 年沿黄城市带耕地碳排放总量总体呈先升高后下降趋势(图 1a)，研究时间范围内，耕地碳排放量峰值出现在 2012 年，为 3.29×10^{6} t，低值出现在 2020 年，为 2.88×10^{6} t，变化率为－12.53%。其中 2011—2012 年，研究区耕地碳排放呈快速增长趋势，仅 1 a 时间沿黄城市带耕地碳排放总量增长 1.98×10^{5} t，增长率为 6.47%。

从碳排放来源结构看(图 1b)，化肥和农用柴油是 2011—2020 年沿黄经济带耕地碳排放的主要来源。10 a 间宁夏沿黄城市带化肥施用产生的碳排放总量为 2.44×10^{7} t，占到同期碳排放总量的 79.00%，农用柴油产生的碳排放总量为 2.88×10^{6} t，占比 9.31%，其次是农作物播种面积产生碳排放总量为 1.44×10^{6} t，占比 4.67%，然后是农用塑料膜产生的碳排放总量为 1.19×10^{6} t，占比 3.85%，最后是农药和农业生产用电量产生的碳排放量总量，二者总占比不及 4%。

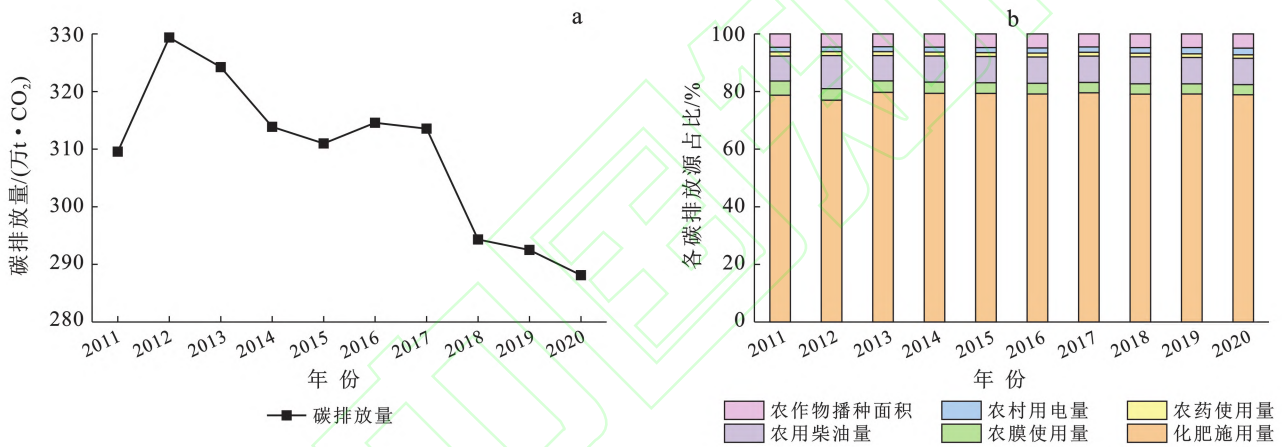

图 1 2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地碳排放总量和各碳源比例

Fig.1 Total carbon emissions and proportion of carbon sources of cultivated land in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020

表 3 2011—2020 宁夏沿黄城市带耕地各碳源排放量

Table 3 Carbon emissions of cultivated land in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020 (10^{4} t，以 CO_2 计)

年份	化肥	农膜	农用柴油	农药	农村用电	农作物播种	合计
2011	243.75	15.23	26.79	4.52	4.95	14.32	309.56
2012	253.65	13.13	37.82	4.58	5.25	14.96	329.37
2013	258.46	12.96	28.39	4.49	5.50	14.44	324.24
2014	249.16	12.27	28.41	4.27	5.35	14.41	313.87
2015	246.79	11.49	28.33	4.26	5.45	14.67	310.98
2016	248.96	11.66	28.76	4.26	5.57	15.34	314.56
2017	249.50	11.25	28.65	4.18	5.77	14.19	313.55
2018	232.83	10.52	27.61	3.70	5.63	14.02	294.31
2019	231.54	10.25	26.84	3.66	6.43	13.78	292.51
2020	227.24	10.23	26.32	3.50	6.67	14.15	288.12

2.1.2 碳排放空间变化 宁夏沿黄城市带各市县耕地碳排放量在空间维度上表现出南北高—中间低的特征(图 2)。如表 4 和图 2 所示，2011—2020 年间宁夏沿黄城市带耕地碳排放总量最大的区域是平罗县和中宁县，其中平罗县碳排放总量最高，为 5.66×10^{6} t，占研究区碳排放总量的 18.3%；中宁县碳排放总量次之，为 4.97×10^{6} t，占研究区碳排放总量的 16.08%。

两县为沿黄城市带粮食主产区，农作物播种面积广阔造成农业生产中化肥农药等物资消耗多，区域碳排放量较高。耕地碳排放总量低于 5.00×10^5 t 的有石嘴山市大武口区和银川市金凤区，其中大武口区碳排放总量最低，仅为 1.60×10^5 t，占研究区耕地碳排放总量的 0.52%，行政区域相对较小、经济发展方式和城市用地占比大是两区耕地碳排放量低的重要原因。

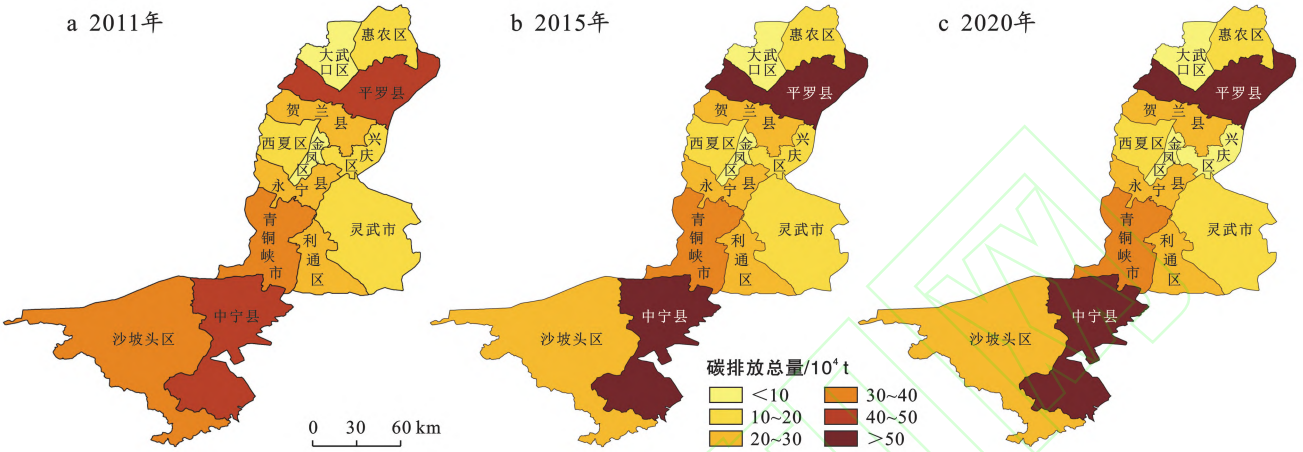

图 2　2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地碳排放总量空间变化

Fig.2　Spatial variation of total carbon emissions from cultivated land in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020

表 4　2011—2020 宁夏沿黄城市带各市县耕地碳排放量

Table 4　Carbon Emissions of cultivated land in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020（10^4 t，以 CO_2 计）

地 区	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
大武口区	1.77	2.56	2.14	2.02	1.17	1.14	1.29	1.30	1.31	1.27
惠农区	16.50	16.48	16.59	15.55	17.23	16.25	16.10	15.05	15.01	14.18
平罗县	42.16	52.55	55.46	56.57	57.73	59.21	60.75	60.10	60.56	60.56
兴庆区	16.03	11.76	12.14	11.49	10.77	10.34	11.24	8.59	8.20	7.76
金凤区	5.13	6.23	6.26	5.77	4.52	4.29	4.41	3.43	2.78	2.82
西夏区	11.67	14.54	14.70	15.84	15.40	15.98	16.09	13.39	12.88	12.73
永宁县	23.31	23.22	25.35	24.31	24.03	23.52	23.61	21.05	20.83	20.72
贺兰县	29.93	30.01	29.67	25.38	25.27	25.02	24.79	24.64	23.89	22.52
灵武市	16.23	16.62	17.78	17.01	16.17	16.90	16.34	13.10	12.19	11.86
利通区	29.78	39.15	27.39	24.10	23.62	23.95	23.19	21.09	20.85	20.29
青铜峡市	35.20	36.37	37.61	36.99	35.64	38.37	39.06	37.66	37.54	38.12
沙坡头区	35.01	30.30	29.03	28.47	28.94	29.25	26.99	25.33	26.51	25.28
中宁县	46.83	49.59	50.11	50.36	50.50	50.33	49.71	49.60	49.96	50.01

从耕地碳排放量最大值出现的范围来看，2012 年耕地碳排放量达最大值的市县有 8 个，分别是大武口区、兴庆区、金凤区、永宁县、贺兰县、灵武市、利通区和沙坡头区，占研究区市县总数的 61.54%。碳排放总量最大的两个市县中宁县和平罗县，分别在 2015 年和 2017 年达到极值，表明宁夏沿黄城市带各市县耕地碳排放不仅在空间分布上不均匀，而且耕地碳排放量出现峰值的时间也有差异。

2.1.3　*碳排放强度时空变化*　由于各市县实际农作物播种面积存在着较大的差异，本文采用碳排放强度，即单位播种面积碳排放量，来探讨沿黄城市带耕地碳排放的时空变化情况。如表 5 所示，2011—2020 年，宁夏沿黄城市带单位播种面积碳排放强度的变化趋势总体呈现先升高后下降的趋势，碳排放强度从 6.49（t/hm²，以 CO_2 计）降低至 5.88（t/hm²，以 CO_2 计），降幅达 9.40%，与耕地碳排放总量变化趋势相似。各市县碳排放强度变化差异明显。截至 2020 年，沿黄城市带 13 个区县中 10 个表现为下降趋势，但平罗县、金凤区、西夏区和中宁县 4 个市县单位播种面积碳排放量较 2011 年有所上升。

表 5 2011—2020 宁夏沿黄城市带各市县耕地碳排放强度变化

Table 5 Changes of carbon emission intensity of cultivated land in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020

(t/hm², 以 CO_2 计)

地 区	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
大武口区	6.48	6.91	6.75	7.82	4.32	3.59	3.45	3.66	3.67	3.44
惠农区	8.41	7.03	6.82	6.38	7.05	6.68	6.61	6.77	6.51	6.23
平罗县	6.06	7.44	7.74	7.89	7.99	8.05	7.87	7.68	8.08	7.94
兴庆区	10.84	8.56	10.39	10.27	9.11	8.09	7.74	6.61	6.49	5.40
金凤区	4.91	6.05	7.12	7.02	5.51	6.56	8.44	6.11	5.53	6.06
西夏区	6.64	8.05	8.69	10.01	10.22	10.77	12.58	8.08	9.41	9.25
永宁县	5.49	5.31	5.66	5.35	5.25	4.97	5.56	4.80	4.79	4.29
贺兰县	6.02	5.96	6.57	5.68	5.17	4.86	5.36	5.21	5.29	4.86
灵武市	5.50	5.66	6.51	6.54	6.73	6.87	5.94	4.93	5.07	4.77
利通区	7.52	9.88	7.01	6.61	6.32	4.79	4.90	5.76	5.85	5.74
青铜峡市	7.59	7.94	8.03	7.15	6.62	6.39	6.77	6.98	7.00	6.86
沙坡头区	4.65	3.89	4.00	3.97	3.94	3.78	4.00	3.69	3.90	3.84
中宁县	6.00	5.44	5.72	5.67	5.63	5.93	7.67	7.19	6.74	6.42

宁夏沿黄城市带碳排放强度空间格局呈由北向南逐步降低向南北高、中间低逐步转变(图 3)。2011 年,宁夏沿黄城市带碳排放强度最低的是中卫市沙坡头区,仅为 4.65 t;最高的是兴庆区,为 10.84 t,两者相差 2.33 倍。

2020 年,碳排放强度最小的是大武口区,仅为 3.44 t,最高的是平罗县,为 7.94 t,两者相差 2.31 倍。2011—2020 年,耕地碳排放强度变化显著的是西夏区和兴庆区,其中西夏区增长幅度最大,从 2011 年的 6.64 t 到 2020 年的 9.25 t,增长速度为39.34%;兴庆区降速最快,从 2011 年的 10.84 t 到 2020 年的 5.40 t,降速为 50.23%。

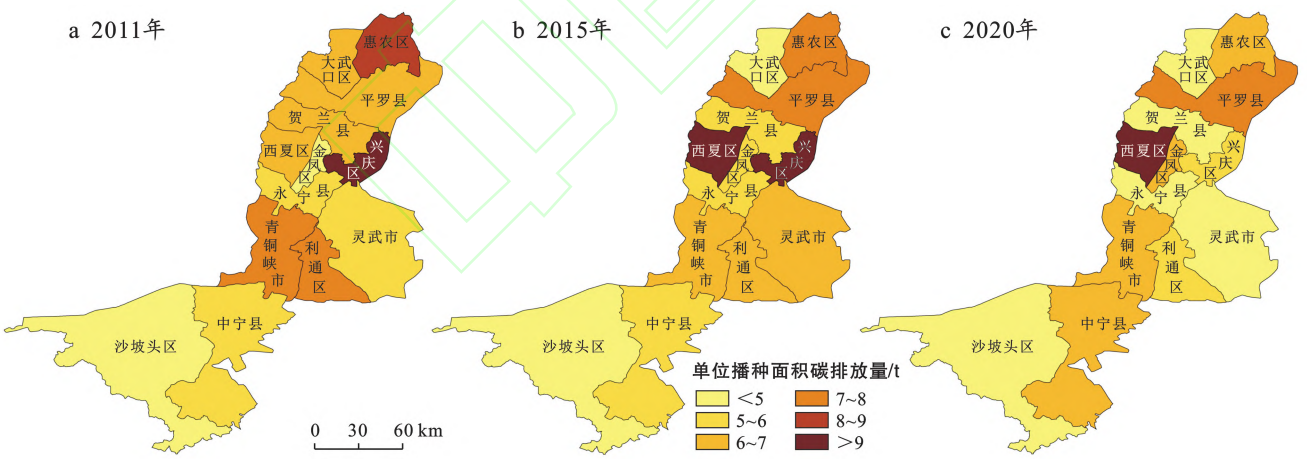

图 3 2011—2020 年宁夏沿黄城市带单位播种面积碳排放量空间变化

Fig.3 Spatial variation of carbon emissions per unit planting area in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020

2.2 沿黄城市带耕地生态效率时空特征

生态效率是衡量耕地利用"经济—社会—生态"效益的重要指标之一,当生态效率值≥1 时,表明生态效率在该年份处于有效状态;当生态效率值<1 时,表明生态效率在该年份处于无效状态[34]

由图 4 可知,2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地利用的生态效率有较为明显的波动,其中 2013,2016,2017 年宁夏沿黄城市带耕地利用的生态效率值<1,处于无效状态,其余年份耕地生态效率值≥1,处于有效状态。

从市县尺度来看(表 6),宁夏沿黄城市带各县耕地生态效率也是非稳定呈波动变化的。除 2019 年外,各市县在不同年份里耕地生态效率均达到过有效状态。整体来看,2011—2020 年耕地生态效率提高的市县数量呈波动递增的趋势,总体耕地利用生态效率在提升。至 2020 年耕地生态效率达到有效状态市县数量从 15%增加到 62%,即在农业生产过程中开始呈现低投入高产出状态。

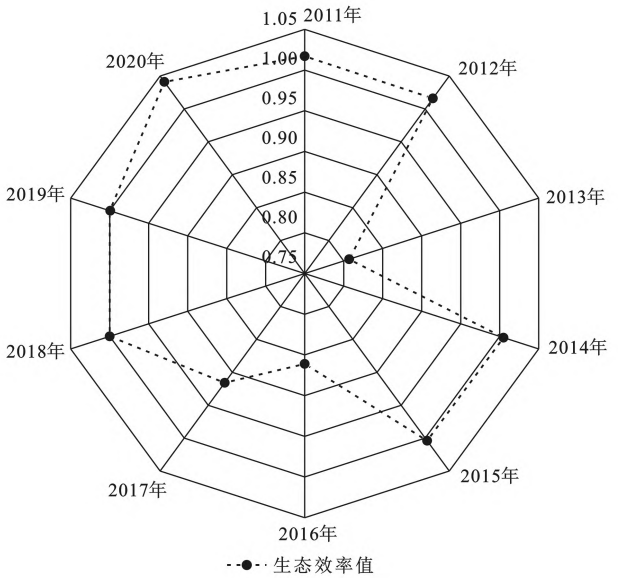

图 4　2011—2020 年沿黄城市带历年耕地生态效率值

Fig.4　Cultivated land eco-efficiency of urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020

采用有效率即 10 年间各市县生态效率达到有效状态的频数进行分析，如表 6 所示，2011—2020 年，耕地生态效率有效率位居前三的市县是银川市西夏区、永宁县和金凤区三地，其中西夏区生态效率值的有效率为 80%，永宁县和金凤区生态效率值的有效率分别为 70%和 60%；其次是灵武市，生态效率值的有效率为 40%；大武口区、惠农区、平罗县、兴庆区、贺兰县和沙坡头区生态效率值的有效率均为 20%；利通区、青铜峡市和中宁县生态效率值未有一年达到有效状态，且利通区年耕地生态效率均值为 0.42，投入产出效率最低。以上表明利通区、青铜峡市和中宁县在农业生产过程中投入产出之间存在较大的效率损失，需要及时调整农业生产要素的投入。

从生态效率的时空变化来看(图 5)，宁夏沿黄城市带的耕地生态效率在时空上变化显著。2011—2020 年耕地生态效率达有效状态的城市数量是呈先降后升态势，空间上表现为银北地区高于银南地区。各地区耕地投入产出比和功能区定位不同是导致生态效率在空间上产生差异的重要因素，这主要与化肥农药等生产物资、农作物播种面积、乡村从业人员、粮食产量、农业产值和碳排放量有关。研究期间，生态效率投入产出指标中 7 个下降 3 个上升，变化较大的有化肥使用总量、乡村从业人员和农业总产值等，其中 2020 年乡村从业人员较 2011 年下降 32.82%，化肥施用总量下降 22.42%，农药使用总量增加 34.8%，碳排放总量下降 6.93%，其他指标如农作物播种面积下降 6.77%，农用柴油使用总量下降 1.73%，农用塑料薄膜使用总量下降 1.24%，粮食总产量下降 2.07%。投入要素和非期望产出碳排放量总体下降，粮食总产量略有波动，而农业产值大幅增加，是导致生态效率提高的重要原因。

表 6　2011—2020 年宁夏沿黄城市带市域耕地生态效率变化

Table 6　Changes of cultivated land eco-efficiency in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020

地 区	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	有效率
大武口区	0.45	0.42	0.47	0.46	0.69	0.88	0.69	1.02	0.94	1.06	20%
惠农区	0.50	0.51	0.50	0.55	0.58	0.59	0.64	1.00	0.83	1.05	20%
平罗县	1.10	0.82	0.79	0.78	0.79	0.73	0.73	0.86	0.73	1.03	20%
兴庆区	0.41	0.49	0.47	1.06	0.53	0.28	0.52	0.60	0.52	1.08	20%
金凤区	1.02	1.04	0.72	1.18	0.87	0.34	1.02	1.02	0.94	1.06	60%
西夏区	1.03	1.03	1.03	1.06	1.01	1.01	1.00	1.12	0.85	0.83	80%
永宁县	0.77	1.03	1.01	1.01	0.95	1.01	1.01	1.07	0.83	1.02	70%
贺兰县	0.74	0.73	0.66	1.05	0.92	0.43	1.02	0.96	0.70	0.82	20%
灵武市	0.60	0.61	0.66	1.04	1.01	0.49	0.76	1.06	0.85	1.04	40%
利通区	0.31	0.29	0.36	0.44	0.47	0.45	0.44	0.50	0.45	0.51	0%
青铜峡市	0.73	0.75	0.71	0.71	0.76	0.71	0.66	0.78	0.63	0.71	0%
沙坡头区	0.31	0.36	0.38	0.38	0.60	0.59	0.67	1.06	0.60	1.05	20%
中宁县	0.62	0.62	0.61	0.63	0.69	0.69	0.63	0.73	0.72	0.76	0%

3　讨 论

3.1　耕地碳排放总量变化

2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地碳排放总量呈先升高后下降趋势，空间上呈现南北高、中间低的空间分布格局。21 世纪 10 年代初是中国“十二五”开局年，加快发展现代农业是这一时期我国农业农村工作的重要任务之一，农业生产中化肥和农用柴油使用量快速增加，导致该时间段耕地碳排放量呈爆发式增长。

党的十八大召开后，宁夏提出了沿黄经济区发展战略，把“打造沿黄生态经济带”作为生态立区战略的首要任务，实施了节水农业、循环农业以及高标准基本农田建设等现代农业工程，农药农膜等相关生产要素的使用量也随之下降，加之农作物播种面积减少，2013 年后宁夏沿黄城市带耕地碳排放呈下降趋势，其中 2013—2015 年出现连续两年的负增长，年增长率为－1.36%。2016 年后，随着城镇化建设的持续推进和退耕还林还草政策的实施，沿黄城市带农田耕地面积逐年减少，耕地碳排放总量持续下降。

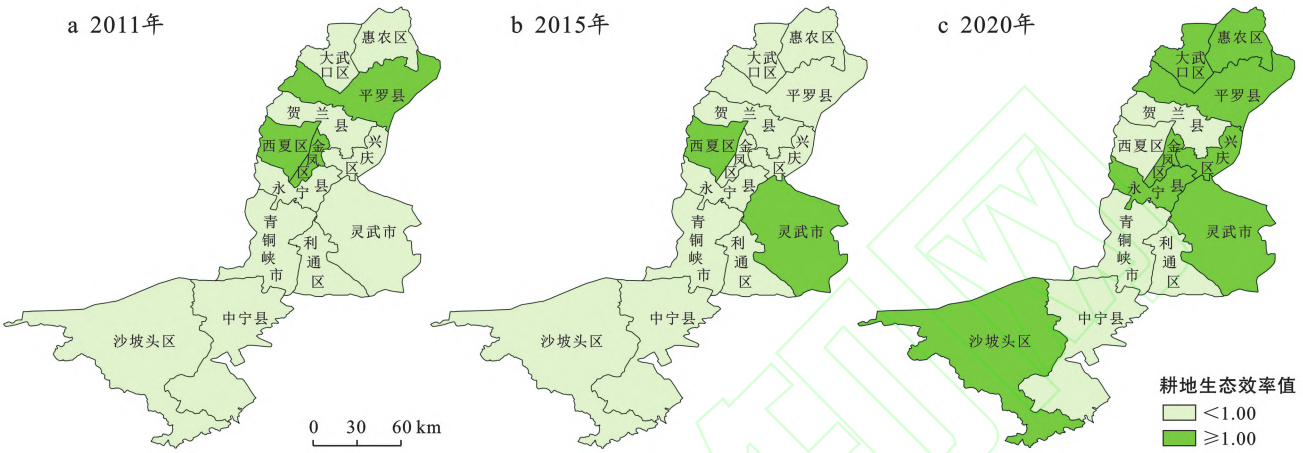

图 5 2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地生态效率空间变化

Fig.5 Spatial variation of cultivated land eco-efficiency in urban belt along Yellow River in Ningxia from 2011 to 2020

中国不同地区耕地碳排放趋势存在一定的差异。如四川省粮食主产区 2000—2019 年间农业碳排放量整体呈上升趋势，但近几年增速有所降低，2012 年农业碳排放量最高[14]，江苏省 2000—2019 年农业碳排放量总体呈现“降低—升高—降低”的变化趋势于，于 2010 年达峰[28]，洞庭湖地区 2007—2017 年碳排放量总体呈现先波动上升后下降的趋势，耕地碳排放量最大值出现在 2012 年[31]，这些区域耕地碳排放变化趋势与本研究区相似，2012 年左右耕地碳排放量出现最大值，亦与本研究区相似。海南岛 1999—2018 年农田碳排放量于 2017 年达到最大值[35]，长江中游城市群 2010—2020 耕地利用碳排放总量呈“先上升后下降”趋势，表现出明显的阶段性特征[36]，虽与本研究区域最大值出现时间不同，但碳排放总体趋势是相似的。

3.2 耕地碳排放强度变化

2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地碳排放强度的变化趋势总体呈现先上升后下降的趋势。碳排放强度的变化一方面受到碳源变化的影响，诸如：农作物生产投入用量和投入结构的变化[37]，另一方面也受到多年耕地面积、农地流转[38]等的影响。如河南省 2000—2020 年碳排放强度总体呈现出先增后减的趋势[39]，这与本研究的碳排放强度结论相同，但形成该趋势的原因却不同，王秀兰等[40]在考察湖北省部分地区碳排放强度的因素发现，包括农户年龄、农户经验、年均农业收入比例、是否参加过农业技术培训等，甚至是否为村干部都成为影响因素之一。河南省在耕地面积未显著减少的背景下通过减少化肥、农药和农膜的使用量来降低碳排放强度，而宁夏沿黄城市带碳排放强度变化原因却更加复杂。

宁夏沿黄城市带共计 7 区 4 县 2 地级市，各市县因功能区定位不同，耕地碳排放强度变化各有特点。平罗县耕地碳排放强度总体呈上升态势，也是宁夏沿黄城市带耕地面积和耕地碳排放强度最大的县。2020 年平罗县农作物播种面积为 7.63×10^4 hm^2，比 2011 年增加 6 700 hm^2，耕地面积基数增加，提高了当地耕地碳排放量，与此同时，平罗县化肥、农药、农膜等生产资料也较 2011 年分别增加了 4.57×10^4，1.33，0.54 t，致使该县耕地碳排放量进一步增加。以 2011 年为基点，探讨农药、化肥、农膜、农用柴油等影响农田碳排放量因素的变化情况，至 2020 年，单位播种面积农药用量和单位播种面积柴油用量增幅最大，分别为 2011 年的 0.53 倍和 0.68 倍，说明农业现代化建设在降低农膜、灌溉用水等生产资料的同时，会增加柴油、农药等的施用量，为减少耕地碳排放量，实现“减碳”和“碳中和”目标，应关注农业清洁能源和病虫害生态防治等碳排放关键技术的推广和应用。

金凤区和西夏区为银川市辖区，2010—2020 年耕地碳排放强度总体呈微弱上升态势。近年来城市化进程加快，两辖区农作物播种面积持续降低，截至 2020 年，金凤区和西夏区农作物播种面积分别比 2011 年减少了 5 800 hm^2 和 3 800 hm^2，但农作物播种面积降低的同时，农用柴油等其他产碳要素未得到

有效降低，同时农业机械化迅速推广，导致两地碳排放强度呈现先增加后减少，总体增加的特点。考察农药、化肥、农膜、农用柴油等影响农田碳排放量因素的变化情况，两区碳排放强度变化的影响因素又不尽相同。影响金凤区碳排放强度变化的主要因素为农用柴油和农业生产用电量，2020 年金凤区单位播种面积柴油用量和单位播种面积用电量分别比 2011 年增加 1.16 和 1.52 倍；影响西夏区碳排放强度变化的主要因素是化肥用量，2020 年西夏区单位播种面积化肥用量比 2011 年增加 0.49 倍。表明金凤区在加强农业机械化推广和农村建设的基础上，应着重考虑节能设备选用和清洁能源替代等技术，减少本地耕地碳排放；西夏区则应关注有机肥、生态治理等措施，降低本地化肥的施用量。

中宁县耕地碳排放强度总体变化不大。中宁是宁夏重要的枸杞、硒砂瓜等特色农作物产地，虽然 2011—2020 年中宁县农作物播种面积变化不大，仅减少 272 hm^2，但作物结构却发生较大变化，枸杞种植面积从 2011 年 3 600 hm^2 增加到 2020 年 8 500 hm^2，不断扩大的枸杞和硒砂瓜种植面积使得化肥农药等农用物资并未有大幅下降，碳排放量依然较高。根据相关规划，未来中宁县将继续扩大枸杞等特色农产品的种植面积，减少化肥、农药、农膜等农业生产资料的施用量，减少碳排放，是需要给予重点关注的问题。

兴庆区耕地碳排放强度呈快速下降趋势，下降幅度超 50%。兴庆区同属银川市辖区，是银川市文化、教育、经济、金融和商贸物流中心。2011—2020 年间，兴庆区农业耕地面积相对稳定变化幅度不大，但在持续推进农业“三减”措施，即减少化肥、农药、除草剂施用量，推广测土配方施肥等方面成绩斐然。截至 2020 年，兴庆区广测土配方施肥技术覆盖率达到 92%，农户施肥结构、施肥比例、施肥方式和方法也在不断的改变，农用化肥施用量由 2011 年的 4.01 t 降至 1.64 t，降幅为 59.10% ，由此致使农用化肥碳排放量发生大幅下降，由 13.17 t 降至 5.38 t，降幅达到 59.15%，农药、农膜等影响耕地碳排放强度因素也呈不同程度降低。通过配方施肥、推广有机肥、堆肥施用、种肥同播和水肥一体化等化肥减量增效的技术模式推广，能够全面促进农业生产系统的生态化良性循环，有力减少耕地碳排放量，是一种值得肯定并推广的措施。

3.3　各市县耕地生态效率变化

农业生态效率强调农业生产与环境协调发展，不仅关注经济产出还考虑了农业生产对土壤、水体和空气等方面的负面影响，是衡量农业可持续发展的重要指标[41]，本文将碳排放量作为非期望产出指标纳入到超效率 SBM 模型中，以生态效率值来反映沿黄城市带耕地投入产出是否合理，发现 10 a 间区域耕地利用的生态效率在空间上分布不均，2011—2020 年，各市县的耕地生态效率变化表现出较大的差异。

大武口区、惠农区、兴庆区、金凤区、永宁县、贺兰县、灵武市、利通区、沙坡头区和中宁县 2020 年耕地生态效率较 2011 年有所提升，但各市县生态效率提升的影响因素却不同。2011—2020 年，耕地生态效率变化最大的是沙坡头区，该区域 2020 年耕地生产投入要素量较 2011 年有明显的下降，其中乡村从业人员和化肥施用量降幅最大，为 51.53% 和 41.85%，而产出要素农业产值和粮食产量不减反增，为 61.46% 和7.32%。分析认为沙坡头地区依托本地沙漠发展绿色蔬菜产业、光伏产业和沙漠旅游业带动了人民就业，乡村就业人数减少，同时推行的农业“化肥农药减量化”“虫口夺粮”病虫害防治等措施，提高了粮食产量，从而使该地区的耕地生态效率得到有效提升；金凤区 10 a 间生态效率增幅最小，为 3.92%。金凤区为银川市辖区，随着城市化进程的加快和行政区职能的凸显，金凤区的农作物播种面积下降了 48.08%，化肥施用量降低了 78.20%，农用塑料膜使用量降低了 55.50%，粮食产量降低了 63.54%，其农业产值却增加了 5.80%，通过对 13 个研究市县的粮食价格研究，发现金凤区单位粮食产量的产值位居第一，功能区定位的明确和经济发展转向，是提高金凤区耕地生态效率的重要原因。

大武口区、惠农区、兴庆区、永宁县、贺兰县、灵武市和利通区，主要表现为农业播种面积大幅减少，粮食产量小幅波动，而农业产值提升明显。大武口区、惠农区、兴庆区、永宁县、灵武市和利通区 2020 年单位面积粮食产量较 2011 年提高了 109.02%，73.44%，69.38%，8.98%，17.63%，45.69%，农业产值提高了 76.72%，25.31%，183.56%，87.49%，42.49%，33.85%。在农作物耕地面积普遍减少的背景下，各市县粮食产量提高的措施却不尽相同：惠农区粮食增产与农用柴油和农用塑料薄膜使用量增加有关，兴庆区粮食增产与农药使用量和农业生产用电量有关，大武口区和永宁县粮食增产与农药使用量和农用塑料薄膜使用量增加有关，灵武市和利通区则是分别由于农业生产用电量和农药使用量增加而提高了粮食产量。需要指出的是，虽然利通区耕地生态效率近年来逐渐提高，但总体仍较低，2020 年利通区单位农业产值二氧化碳排放量为 1.35 t，位居宁夏沿黄城市带第六，而人均农业产值为 3 400 元，位居第十一位。可能受乡村从

业人员、碳排量和农业产值的综合影响，农业生产投入与农业产出间的不平衡是造成该区域生态效率低的主要原因，如何提高农业产值是未来利通区农业发展需要关注的重要方向。

中宁县是唯一 1 个耕地碳排放量增加，且生态效率值同步提高的城市。近几年，中宁县大力调整农业结构，通过种植枸杞、硒砂瓜等特色农作物提高农产品价值，2020 年农业产值较 2011 年提高了 54.76%，碳排放量仅增加了 6.78%，增加的碳排放量主要与枸杞、硒砂瓜种植面积和农药使用量的增加有关。农业产值的快速增加带动生态效率的稳步提高，但相较于其他市县，中宁县生态效率还有较大的提升空间，继续调整农产品结构，增加农业产值，减少农药施用量，依然是中宁县未来优化生态效率的重要方向。

平罗县、青铜峡市和西夏区 2020 年耕地生态效率较 2011 年有所下降。分析各县生态效率投入产出指标变化，农作物播种面积和乡村从业人员增加是平罗县和青铜峡市生态效率降低的重要因素。其中平罗县农作物播种面积增加 4.57×10^4 hm^2，乡村从业人员增加 5.40×10^4 人；青铜峡市农作物播种面积增加 0.15 hm^2，乡村从业人员增加 1.35×10^5 人，农用耕地面积、化肥农药等生产要素的增加，使得平罗县和青铜峡市碳排放量分别增加了 1.84×10^5 t 和 2.92×10^4 t。此外，平罗县乡村从业人员增幅为 15.70%，而粮食产量增幅为 8.57%，青铜峡市乡村从业人员增幅为 41.95%，而粮食产量增幅仅为 8.29%，农业生产投入与产出不协调导致了两地生态效率值的下降。西夏区则是在耕地面积较少的背景下，化肥施用量有所增加。2020 年西夏区单位播种面积化肥用量比 2011 年增加 0.49 倍，减少化肥施用量成为西夏区减少碳排放提高耕地生态效率的重点方向。

目前，已有部分学者进行了耕地利用生态效率测算分析，如：2007—2020 年长江中下游粮食主产区生态效率存在着两极分化现象，区域间差异明显[42]；2005—2019 年陕西省耕地利用效率尚处于中等效率发展水平，区域差异显著，空间分布不均衡[43]；2000—2020 年苏北地区农业生态效率空间分布不均衡，整体呈现“南高北低”的分布特征，空间集聚效应明显[41]。虽然同上述文献研究的区域不同，生态效率评价方法上存在差异，然而结论却是相似的，即生态效率空间分布均表现出明显的不均衡性。

4 结论与建议

4.1 结 论

本文基于多年统计数据和实地调研，计算出 2011—2020 年宁夏沿黄城市带耕地碳排放量，并采用非期望产出 SBM 超效率模型测算各市县耕地的生态效率，探讨了宁夏沿黄城市带碳排放与生态效率的时空格局。

（1）2011—2020 年间，宁夏沿黄城市带耕地碳排放总量整体呈先升高后下降趋势，化肥和农用柴油是农业生产过程中主要的碳排放来源。

（2）宁夏沿黄城市带单位播种面积碳排放强度的变化趋势总体呈现先升高后下降的趋势，由于各市县发展特点不同，表现出较大的差异，其中平罗县和中宁县单位播种面积碳排放强度较高，应作为控碳减排的重点对象。

（3）宁夏沿黄城市带各市县的耕地生态效率有较为明显的波动，而利通区多年耕地平均生态效率在 0.42 左右，适时调整农业生产投入与产出间的关系已然成为利通区农业发展亟须考虑的问题。

4.2 建 议

（1）充分利用当地畜禽粪便资源，推广化肥减量增效技术。畜牧养殖业是宁夏支柱产业之一，每年的畜禽粪便高达 20 多万吨[44]，通过鼓励农户施用有机肥，将畜禽粪便转变为有机肥，推广堆肥施用、种肥同播等有机肥替代和化肥减量技术以减少化肥投入量，是降低耕地碳排放量重要措施之一。

（2）推进农用资源高效利用，推动农业绿色低碳发展。近年来随着农机数量的增加，农用柴油造成的碳排放量不可忽视，政府在加强农机购置补贴的同时，也应提高高效节能的新型农机使用比例，依托当地优质的太阳能和风能，扩大清洁能源在农机能源上的比重。

（3）制定差异化农业发展策略，提升、稳定农业生态效率水平。全面展开高标准农田项目建设和现代高效节水农业示范区建设，减少因农用地破碎化和作物灌溉所造成的机械化率低和人工成本高的问题，提高地区耕地生态效率。

参考文献(References)

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of Food and Agriculture 2016: Climate Change, Agriculture and Food Security [R]. Rome, Italy: FAO, 2016.

[2] 徐玥，王辉，韩秋凤，等.我国耕地碳排放时空特征与影响因素[J].江苏农业科学，2022，50(16)：218-226.
Xu Yue, Wang Hui, Han Qiufeng, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of China's cultivated land carbon emissions [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(16): 218-226.

[3] 苑韶峰,唐奕钰.低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J].经济地理,2019,39(2):190-198.
Yuan Shaofeng, Tang Yiyu. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River economic belt based on low carbon perspective [J]. Economic Geography, 2019,39(2):190-198.

[4] 朱向梅,王子莎.黄河流域碳水足迹评价及时空格局研究[J].环境科学与技术,2020,43(10):200-211.
Zhu Xiangmei, Wang Zisha. Study on the assessment of carbon and water footprint and its spatial-temporal pattern in the Yellow River Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(10):200-211.

[5] 徐影,郭楠,茹凯丽,等.碳中和视角下福建省国土空间分区特征与优化策略[J].应用生态学报,2022,33(2):500-508.
Xu Ying, Guo Nan, Ru Kaili, et al. Characteristics and optimization strategies of territorial space zone in Fujian Province, China based on carbon neutrality [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(2):500-508.

[6] 陈舜,逯非,王效科.中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J].生态学报,2015,35(19):6371-6383.
Chen Shun, Lu Fei, Wang Xiaoke. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(19):6371-6383.

[7] 杭晓宁,张健,胡留杰,等.2006—2015 年重庆市农田生态系统碳足迹分析[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(5):524-531.
Hang Xiaoning, Zhang Jian, Hu Liujie, et al. Analysis of carbon footprints in farmland ecosystem of Chongqing city 2006—2015 [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018,44(5):524-531.

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

[9] 张学智,王继岩,张藤丽,等.中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J].环境科学与技术,2021,44(3):200-208.
Zhang Xuezhi, Wang Jiyan, Zhang Tengli, et al. Assessment of methane emissions from China's agricultural system and low carbon measures [J]. Environmental Science & Technology, 2021,44(3):200-208.

[10] 禹康康,王延华,孙恬,等.太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J].土壤,2022,54(2):406-414.
Yu Kangkang, Wang Yanhua, Sun Tian, et al. Changes and prediction of carbon emission from different land use types in Taihu Lake basin [J]. Soils, 2022,54(2):406-414.

[11] 冉锦成,马惠兰,苏洋.西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):623-632.
Ran Jincheng, Ma Huilan, Su Yang. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in Northwest China [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017,39(3):623-632.

[12] 凡雨宸.基于 GIS-GWR 的湖南省土地利用碳排放时空演变及其影响因素分析[D].湖南 株洲:湖南工业大学,2020.
Fan Yuchen.Spatio-temporal evolution of land use carbon emissions and its influencing factors in Hunan province based on GIS-GWR. [D]. Hunan Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2020.

[13] 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 Zhaoxue, Zhan Wenxi, Wang Hongyan, 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.

[14] 杨青林,赵荣钦,赵涛,等.县域尺度农业碳排放效率与粮食安全的关系[J].中国农业资源与区划,2023,44(2):156-169.
Yang Qinglin, Zhao Rongqin, Zhao Tao, et al. Elationship between agricultural carbon emission efficiency and food security at county scale [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(2):156-169.

[15] Wang Kaiyong, Zhang Pengyan. The research on impact factors and characteristic of cultivated land resources use efficiency: Take Henan Province, China as a case study [J]. IERI Procedia, 2013,5:2-9.

[16] 梁流涛,曲福田,王春华.基于 DEA 方法的耕地利用效率分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(2): 242-246.
Liang Liutao, Qu Futian, Wang Chunhua. Analysis on cultivated land use efficiency based on dea [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008,17(2):242-246.

[17] Yang Chih-hai, Wu Leah, Lin Huilin. Analysis of total-factor cultivated land efficiency in China's agriculture [J]. Agricultural Economics (Zemědělská Ekonomika), 2010,56(5):231-242.

[18] 刘玉海,武鹏.转型时期中国农业全要素耕地利用效率及其影响因素分析[J].金融研究,2011(7):114-127.
Liu Yuhai, Wu Peng. Total-factor cultivated land-use efficiency and its influencing factors in China's agriculture during the transitional period [J]. Journal of Financial Research, 2011(7):114-127.

[19] 吴昊玥,孟越,黄瀚蛟,等.中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异[J].自然资源学报,2022,37(5):1148-1163.
Wu Haoyue, Meng Yue, Huang Hanjiao, et al. Estimation and spatio-temporal divergence of the low-carbon performance of cropland use in China [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1148-1163.

[20] 马林燕,张仁慧,潘子纯,等.中国省际耕地利用生态效率时空格局演变及影响因素分析:基于 2000—2019 年面板数据[J].中国土地科学,2022,36(3):74-85.
Ma Linyan, Zhang Renhui, Pan Zichun, et al. Analysis of the evolution and influencing factors of temporal and spatial pattern of eco-efficiency of cultivated land use among provinces in China: Based on panel data from 2000 to 2019 [J]. China Land Science, 2022,36(3):74-85.

[21] 冀正欣,王秀丽,李玲,等.南阳盆地区耕地利用效率演变及其影响因素[J].自然资源学报,2021,36(3):688-701.
Ji Zhengxin, Wang Xiuli, Li Ling, et al. The evolution of cultivated land utilization efficiency and its influencing factors in Nanyang Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(3):688-701.

[22] 吴欣,刘仕鑫,赵立燕,等.黄河流域耕地利用效率评估及其提升路径研究[J].农业现代化研究,2022,43(4):702-714.
Wu Xin, Liu Shixin, Zhao Liyan, et al. Study on the improvement of farmland use efficiency in the Yellow River Basin from the perspective of high-quality development [J]. Research of Agricultural Modernization, 2022,43(4):702-714.

[23] 臧俊梅,唐春云,王秋香,等.基于 Super-SBM 模型的广东省耕地利用效率空间非均衡性及影响因素研究[J].中国土地科学,2021,35(10):64-74.
Zang Junmei, Tang Chunyun, Wang Qiuxiang, et al. Research on spatial imbalance and influencing factors of cultivated land use efficiency in Guangdong Province based on super-SBM model [J]. China Land Science, 2021,35(10):64-74.

[24] 宋强敏,孙才志,盖美.基于非期望超效率模型的辽宁沿海地区海洋生态效率测算及影响因素分析[J].海洋通报,2019,38(5):508-518.
Song Qiangmin, Sun Caizhi, Gai Mei. Calculation of marine ecological efficiency and analysis of influencing factors in coastal areas of Liaoning based on unexpected super efficiency model [J]. Marine Science Bulletin, 2019,38(5):508-518.

[25] 杜天洋,烁雅,蔡紫娟.基于非期望产出 SBM 的区域生态效率实证研究[J].经济研究导刊,2019(19):62-64.
Du Tianyang, Shuo Ya, Cai Zijuan. Empirical study on regional ecological efficiency based on unexpected output SBM [J]. Economic Research Guide, 2019(19):62-64.

[26] 马彩虹,安斯文,滑雨琪,等.宁夏沿黄经济带生态用地格局演变及其驱动机制[J].经济地理,2022,42(6):179-187.
Ma Caihong, An Siwen, Hua Yuqi, et al. Evolution and driving mechanism of ecological land use along the yellow economic belt in Ningxia [J]. Economic Geography, 2022,42(6):179-187.

[27] 李波,张俊飚,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,2011,21(8):80-86.
Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2011,21(8):80-86.

[28] 李孝忠,李佳辰,李东.低碳经济视域下黑龙江省农业现代化水平综合评价[J].农业经济与管理,2020(6):33-42.
Li Xiaozhong, Li Jiachen, Li Dong. Comprehensive evaluation of agricultural modernization level in Heilongjiang Province from perspective of low carbon economy [J]. Agricultural Economics and Management, 2020(6):33-42.

[29] 邱子健,靳红梅,高南,等.江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J].农业环境科学学报,2022,41(3):658-669.
Qiu Zijian, Jin Hongmei, Gao Nan, et al. Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(3):658-669.

[30] 张金梦.优化核算方法提升碳数据质量[N].中国能源报,2022-03-21(019).
Zhang Jinmeng. Optimising accounting methods and improving carbon data quality [N]. China Energy News, 2022-03-21(019).

[31] 文高辉,胡冉再琪,唐璇,等.洞庭湖区耕地利用碳排放与生态效率时空特征[J].生态经济,2022,38(7):132-138.
Wen Gaohui, Hu R, Tang Xuan, et al. Spatiotemporal characteristics of carbon emission and ecological efficiency of cultivated land use in Dongting Lake region [J]. Ecological Economy, 2022,38(7):132-138.

[32] Ayres R U. Peer reviewed: Toward a zero-emissions economy [J]. Environmental Science & Technology, 1998,32(15) 366A-367A.

[33] 成刚.数据包络分析方法与 MaxDEA 软件[M].北京:知识产权出版社,2014.
Cheng Gang. Data Envelopment Analysis Methods and MaxDEA Software[M]. Bei Jing: Intellectual Property Publishing House, 2014.

[34] 闫涛,张晓平,赵艳艳.基于超效率 SBM 模型的中国城市生态效率时空演变及影响因素[J].中国科学院大学学报,2021,38(4):486-493.
Yan Tao, Zhang Xiaoping, Zhao Yanyan. Spatiotemporal evolution of urban eco-efficiency in China and its influencing factors based on super-efficiency SBM model [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021,38(4):486-493.

[35] 叶文伟,王城城,赵从举,等.近 20 年海南岛热带农田生态系统碳足迹时空格局演变[J].中国农业资源与区划,2021,42(10):114-126.
Ye Wenwei, Wang Chengcheng, Zhao Congju, et al. Spatial and temporal evolution of carbon footprint of tropical farmland ecosystem in Hainan Island in recent 20 years [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021,42(10):114-126.

[36] 熊子昕,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[J].水土保持通报,2023,43(3):406-413.
Xiong Zixin, Kuang Bing, Ke Nan. 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 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(3):406-413.

[37] 闫明.农业生产碳足迹及氮肥去向的计量研究[D].江苏南京:南京农业大学,2015.
Yan Ming. Quantitative evaluation of carbon footprint and fertilizer nitrogen fate in agricultural [D]. Jiangsu Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.

[38] 吉雪强,刘慧敏,张跃松.中国农地流转对农业碳排放强度的影响及作用机制研究[J].中国土地科学,2023,37(2):51-61.
Ji Xueqiang, Liu Huimin, Zhang Yuesong. Study on the influence of rural land transfer on agricultural carbon emission intensity and its mechanism in China [J]. China Land Science, 2023,37(2):51-61.

[39] 李洁,聂红民,许国震.基于统计年鉴数据分析河南省农作物生产减碳特征[J].中国农业气象,2023,44(9):759-768.
Li Jie, Nie Hongmin, Xu Guozhen. Characteristics analysis on carbon reduction of crop production in Henan Province based on the statistical yearbook data [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023,44(9):759-768.

[40] 王秀兰,孟焱鑫,单玉红,等.农户农业生产的碳排放及其影响因素:以湖北省部分地区为例[J].水土保持通报,2020,40(6):160-167.
Wang Xiulan, Meng Yanxin, Shan Yuhong, et al. Carbon emissions and influencing factors of farmers' agricultural production: Taking some areas in Hubei Province as examples [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(6):160-167.

[41] 罗家祺,金晓斌,刘晶,等.2000—2020 年苏北地区农业生态效率变化及其影响因素分析[J].农业工程学报,2023,39(15):239-248.
Luo Jiaqi, Jin Xiaobin, Liu Jing, et al. Process and influencing factors of agricultural eco-efficiency in northern Jiangsu of China from 2000 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(15):239-248.

[42] 范正根,邓超,范雨琪,等."双碳"目标视角下耕地利用生态效率测度及其时空特征:以长江中下游粮食主产区为例[J].生态经济,2023,39(11):119-127.
Fan Zhenggen, Deng Chao, Fan Yuqi, et al. Measurement of eco-efficiency for cultivated land use and its spatial-temporal characteristics from the perspective of "double carbon" target: Taking the main grain producing areas in the mid and lower reaches of the Yangtze River as an example [J]. Ecological Economy, 2023,39(11):119-127.

[43] 王睿,员学锋,杨悦等.陕西省生态环境对耕地利用生态效率的响应[J].水土保持研究,2024,31(2):422-430.
Wang Rui, Yuan Xuefeng, Yang Yue, et al. Response of ecological environment to ecological efficiency of cultivated land use in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):422-430.

[44] 张小红,陶红,王亚娟,等.银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估[J].环境科学,2021,42(10):4933-4941.
Zhang Xiaohong, Tao Hong, Wang Yajuan, et al. Pollution characteristics and risk assessment of tetracycline antibiotics in farmland soil in Yinchuan [J]. Environmental Science, 2021,42(10):4933-4941.