

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.030.

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 Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 422-430.

陕西省生态环境对耕地利用生态效率的响应

王睿^{1,2,3}, 员学锋^{2,3}, 杨悦^{2,3}, 赵雨^{2,3}

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054;

2. 长安大学 土地工程学院, 西安 710064; 3. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710064)

摘要: [目的] 揭示陕西省耕地利用生态效率、生态环境质量的时空分布特征, 阐明生态环境质量对于耕地利用生态效率的响应方式, 进而为陕西省农业高质量发展提供科学支撑。 [方法] 以陕西省为研究区域, 基于遥感数据, 计算了遥感生态指数以表征陕西省生态环境质量; 利用 SBM 模型测度陕西省耕地利用生态效率; 采用地理加权回归模型探究了生态环境对耕地利用生态效率的响应。 [结果] (1) 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省耕地利用生态效率总体上处于中等水平, 有 88% 以上的地区属于低效率、较低效率和中等效率等级; (2) 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省生态环境质量在不断提高, 黄土丘陵沟壑区和毛乌素沙地等地区生态环境质量有明显改善, 空间格局总体上保持“南高北低”不变; (3) 陕西省耕地利用生态效率和生态环境存在显著的正相关, 相关关系空间分布具有不均衡性。 [结论] 陕西省生态环境与耕地利用生态效率的协同发展模式并不稳定, 还需进一步探索与巩固。

关键词: 耕地利用生态效率; 非期望产出超效率 SBM 模型; 遥感生态指数; 地理加权回归模型; 陕西省

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0422-09

Response of Ecological Environment to Ecological Efficiency of Cultivated Land Use in Shaanxi Province

Wang Rui^{1,2,3}, Yuan Xuefeng^{2,3}, Yang Yue^{2,3}, Zhao Yu^{2,3}

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Land Renovation, Xi'an 710064, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the response mode and degree of ecological environment to the ecological efficiency of cultivated land use, which is of great significance for realizing the coordinated development of agricultural sustainable development and ecological environment protection. [Methods] Shaanxi Province was taken as the research area. Remote sensing ecological index was calculated to characterize the ecological environment quality of Shaanxi Province based on remote sensing data. SBM model was used to measure the ecological efficiency of cultivated land use in Shaanxi Province. The geographical weighted regression model was used to explore the response of ecological environment to the ecological efficiency of cultivated land use. [Results] (1) In 2005, 2010, 2015 and 2019, the ecological efficiency of cultivated land use in Shaanxi Province was generally at the medium level, and more than 88% of the areas were classified as low efficiency, low efficiency and medium efficiency. (2) In 2005, 2010, 2015 and 2019, the ecological environment quality of Shaanxi Province was continuously improved, and the ecological environment quality of loess hilly and gully region and Mu Us Sandy Land were significantly improved, and the spatial pattern remained high level in the south and low level in the north in general. (3) There was a

收稿日期: 2023-05-17

修回日期: 2023-06-06

资助项目: 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(30010235203)

第一作者: 王睿(1998—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为区域发展与生态环境研究。E-mail: wwwangrui21@163.com

通信作者: 员学锋(1977—), 男, 陕西延安人, 博士, 教授, 主要从事土地利用与评价、人地关系与区域可持续发展研究。E-mail: zyxfyun@chd.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

significant positive correlation between the ecological efficiency of cultivated land use and the ecological environment in Shaanxi Province, and the spatial distribution of the correlation relationship was unbalanced. [Conclusion] The synergistic development model of ecological environment and ecological efficiency of cultivated land use in Shaanxi Province is not stable, and needs to be further explored and consolidated.

Keywords: cultivated land use ecological efficiency; super-efficient SBM model for undesired output; remote sensing ecological index; geographical weighted regression model; Shaanxi Province

生态环境是人类社会发展重要的自然基础和主要的物质来源,在人类的生产生活中发挥着重要作用,同时,它也是人类生产生活废弃物和人类活动作用的承担者。21 世纪以来,中国经济快速发展,同时也出现了一系列环境问题,大气污染、自然灾害频发等^[1]。长此以往,生态环境问题会给人类的生产、生活带来负向影响,尤其是强烈依赖生态环境的农业生产^[2]。耕地作为农业生产活动中重要的生产要素之一,具有生产、生活和生态功能^[3]。据第七次全国人口普查数据显示,2020 年底,我国有 14 亿人口,庞大的人口基数叠加,消费不断升级,粮食需求仍在不断增长。面对全球农产品贸易的不确定性,二十大报告强调要“确保中国人的饭碗牢牢端在自己手中”。因此,在“人与自然和谐共生”发展目标下,探究生态环境对耕地利用生态效率的响应方式与程度,对促进生态环境和耕地利用协同发展、保障粮食安全、实现农业现代化发展具有重要意义^[4]。

国外较少提及耕地利用生态效率,研究多集中于农业和农作物生产效率等方面^[5-6]。近年来,国内对粮食安全和耕地利用的关注度提高,学者在耕地利用生态效率度量体系的构建^[7]、耕地利用生态效率时空差异分析及影响因素等^[8]方面进行了深入研究。在研究方法上,数据包络分析(DEA)可以有效避免函数形式错误,逐渐成为耕地利用生态效率测算研究的主流模型。在评价指标体系上,目前主要由资源投入和农业产出两部分组成,在“双碳目标”背景下,学者开始将农业面源污染^[9]、碳排放^[10]作为非期望产出引入到指标体系中,但目前的研究很少考虑耕地利用过程中的碳汇。在对生态环境质量的研究中,徐涵秋^[11]基于遥感数据构建遥感生态指数模型来评价生态环境质量,因其数据易获取、主观因素影响小而应用广泛。在对不同地区进行研究时,学者对遥感生态指数有所改进^[12]。现有研究^[13-14]主要集中在土地利用对生态环境的影响,在研究区内部生态环境对耕地利用生态效率的响应方式和程度方面研究分析较少。基于此,本文以陕西省为研究区域,以县域为研究单元,将碳排放量作为非期望产出,农业生产过程中的碳汇作为生态期望产出引入耕地利用生态效率评价

指标体系中,运用非期望产出的超效率 SBM 模型等方法,探究生态环境对耕地利用生态效率的响应方式和程度,以期为陕西省耕地利用转型升级和农业高质量发展提供方向指引和科学依据。

1 研究数据、指标选取与研究方法

1.1 研究区域与研究数据

陕西省位于 31°42′—39°35′N,105°29′—111°15′E,年均温为 13.7℃,年均降水量 680 mm,地势南北高,中间低,秦岭和黄土高原将陕西划分为陕北黄土高原、关中平原和陕南秦巴山地三大自然区,造成省内自然地理环境的空间差异性明显,耕地利用条件各不相同。在国家推进质量兴农、黄河流域高质量发展大背景下,陕西省位于黄河中游,地处黄土高原区,是典型的气候变化敏感区和生态环境脆弱区,农业发展的质量效益不高,有较大提升空间^[15]。

研究选取 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省 103 个(区)县作为研究对象(因西安市新城区、莲湖区、碑林区和雁塔区内无耕地,未将其作为研究对象),耕地投入和产出数据主要来源于《中国县域统计年鉴 2005—2019 年》《陕西统计年鉴 2005—2019 年》以及陕西省各市的统计年鉴(2005 年、2010 年、2015 年、2019 年)。对于个别年份缺失数据采用线性趋势值法、平均估值法等方法补齐。生态环境质量分析所需的遥感数据来源于 Google Earth Engine (GEE),遥感生态指数具有季节性波动特点,因此选取 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年 5—8 月的 MODIS 数据来计算遥感生态指数。

1.2 耕地利用生态效率指标选取

基于耕地利用生态效率的内涵^[16],将耕地利用生态效率评价指标体系分为投入、期望产出和非期望产出 3 部分。参照已有研究成果^[16],结合柯布道格拉斯生产函数,选取 10 项指标构建陕西省耕地利用生态效率评价指标体系(表 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 耕地利用碳汇量测算方法 耕地利用的碳汇主要来自农作物生长周期中光合作用形成的净初级生产量。公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^k C_i = \sum_{i=1}^k (c_i \cdot Y_i \cdot \frac{1-r_i}{HI_i}) \quad (1)$$

式中： C 为农作物碳吸收总量； C_i 为某种农作物的碳吸收总量； k 为农作物种类数； c_i 为作物碳吸收率；

Y_i 为作物的经济产量(统计值)； r_i 为作物经济产品部分的含水量； HI_i 为作物经济系数。农作物的相关参数主要参考王修兰^[17]和韩召迎等^[18]相关研究成果(表 2)。

表 1 耕地利用生态效率指标

Table 1 Ecological efficiency index of cultivated land use

指标	指标释义	
投入指标	耕地投入	粮食播种面积(万 hm ²)
	劳动力投入	第一产业从业人员(万人)
	农药投入	农药使用量(t)
	化肥投入	化肥施用折纯量(t)
	农膜投入	农用地膜使用量(t)
	农机投入	农业机械总动力(万 kW)
期望产出指标	农业产值	农业产值(万元)
	粮食产量	粮食总产量(t)
	碳吸收	主要农作物生长全生命周期中的碳吸收(t)
非期望产出指标	碳排放	农用物资碳排放、土壤 N ₂ O 排放、稻田 CH ₄ 排放(t)

表 2 中国主要农作物经济系数与碳吸收率

Table 2 Economic coefficients and carbon absorption rates of major crops in China

品种	经济系数	含水量/%	碳吸收率
水稻	0.45	12	0.414
小麦	0.40	12	0.485
玉米	0.40	13	0.471
豆类	0.34	13	0.450
油菜籽	0.25	10	0.450
棉花	0.10	8	0.450
薯类	0.70	70	0.423
蔬菜	0.60	90	0.450

1.3.2 耕地利用碳排放量测算方法 参考田云等^[19]的相关研究,耕地利用碳排放源主要有农用物资碳排放、土壤 N₂O 排放、稻田 CH₄ 排放 3 个方面,计算公式如下:

$$E = \sum E_i = \sum (T_i \cdot \delta_i) \quad (2)$$

式中： E 为耕地利用碳排放总量； E_i 为各类碳源碳排放量； T_i 为各碳排放的量； δ_i 为各碳排放的碳排放系数(表 3)。

为了方便分析,将 N₂O 和 CH₄ 置换成标准 C,依据 IPCC 第 4 次评估报告(2007 年),1 t N₂O 相当于 298 t CO₂ (81.272 7 t C),1 t CH₄ 相当于 25 t CO₂ (6.818 2 t C)。

1.3.3 非期望产出超效率 SBM 模型 非期望产出超效率 SBM 模型在考虑非期望产出的情况下,解决了 SBM 模型计算的效率值只能保持在(0, 1]区间内的问题,可以进一步对评价单元进行分析,计算公式如下:

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} (\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}})}$$

$$s.t. x_{i0} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j x_j - s_i^x, \forall i; y_{k0} \leq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j y_j + s_k^y,$$

$$\forall k; z_{l0} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j z_j - s_l^z, \forall l;$$

$$1 - \frac{1}{s_1 + s_2} (\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}}) > 0; s_i^x \geq 0, s_k^y \geq 0, s_l^z \geq 0,$$

$$\lambda_j \geq 0, \forall i, j, k, l \quad (3)$$

式中： ρ 为每个单元的效率值； s_1 和 s_2 分别为期望产出和非期望产出； s_i^x , s_k^y 和 s_l^z 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量； x_0 , y_0 和 z_0 分别为研究单元的投入、期望产出和非期望产出向量； x_j , y_j 和 z_j 则分别为投入、期望产出和非期望产出矩阵； λ 为权重向量。

1.3.4 遥感生态指数构建 遥感生态指数(RSEI)是由绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)、热度(LST)4 个指标通过主成分分析提取第一主成分后得到^[11],计算方法如下。

NDVI 计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) \quad (4)$$

式中： ρ_i 为 Landsat TM/OLI 对应 i 波段的反射率。

WET 计算公式为:

$$WET = 0.2408\rho_{blue} + 0.3132\rho_{green} + 0.1147\rho_{red} + 0.2489\rho_{NIR1} - 0.3122\rho_{NIR2} - 0.6416\rho_{SWIR1} - 0.5087\rho_{SWIR2} \quad (5)$$

式中： ρ_i 为 Landsat TM/OLI 对应 i 波段的反射率。

NDBSI 计算公式为:

$$NDBSI = (SI + IBI) / 2$$

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{NIR})}$$

$$IBI = IBI_1 / IBI_2$$

$$IBI_1 = \frac{2\rho_{SWIR2}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{red} + \rho_{NIR}} + \rho_{green} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{green}) \right]$$

$$IBI_2 = \frac{2\rho_{SWIR2}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{red} + \rho_{NIR}} + \rho_{green} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{green}) \right]$$

(6)

式中: ρ_i 为 Landsat TM/OLI 对应 i 波段的反射率。

表 3 主要碳源碳排放系数

Table 3 Carbon emission coefficients of main carbon sources

碳源	排放类别	排放系数	参考文献
化肥	C	0.8956 kg/kg	West 等 ^[20]
农药	C	4.9341 kg/kg	West 等 ^[20]
农膜	C	5.18 kg/kg	李波等 ^[21]
灌溉	C	20.476 kg/hm ²	李波等 ^[21]
翻耕	C	312.6 kg/km ²	伍芬琳等 ^[22]
农业机械总动力	C	0.18 kg/kW	West 等 ^[20]
水稻	N ₂ O	0.24 kg/hm ²	王智平 ^[23]
春小麦	N ₂ O	0.4 kg/hm ²	于克伟等 ^[24]
冬小麦	N ₂ O	2.05 kg/hm ²	庞军柱等 ^[25]
大豆	N ₂ O	0.77 kg/hm ²	熊正琴等 ^[26]
玉米	N ₂ O	2.532 kg/hm ²	王少彬等 ^[27]
蔬菜	N ₂ O	0.95 kg/hm ²	邱炜红等 ^[28]
水稻	CH ₄	12.51 g/m ²	田云等 ^[19]

LST 计算公式为:

$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda T / \rho) \ln \epsilon} - 273.15 \quad (7)$$

式中: T 为传感器探测到的亮度温度; λ 为热红外波段的波长; ϵ 为地表比辐射率,通过 NDVI 计算得到。

由于 4 个指标量纲不统一,所以对指标进行归一化处理,公式如下:

$$I = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (8)$$

式中: I 为某指标的归一化值; I_i 为某指标值; I_{min} 和 I_{max} 为某指标最小值和最大值。

经过归一化处理后的 4 个指标通过主成分分析确定权重,得到初始的遥感生态指数 RSEI₀,计算公式如下:

$$RSEI_0 = PC1[f(NDVI, WET, NDBSI, LST)] \quad (9)$$

式中: $RSEI_0$ 为初始的遥感生态指数; $PC1$ 为第一主成分; f 为对各指标进行归一化处理。最后将 $RSEI_0$ 进行归一化处理得到最终遥感生态指数 RSEI。

1.3.5 地理加权回归模型 地理加权回归模型(GWR)的实质是在研究区域内每个点处建立局部回归方程,GWR 既可以探索研究对象之间的相关关

系,也可以反映研究对象的在研究区域内的空间变化^[13]。模型公式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^k \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \epsilon_i \quad (10)$$

式中: y_i 为采样点 i 的因变量值; β_0 为截距; (u_i, v_i) 为采样点的常数项; x_{ik} 为采样点 i 的第 k 个自变量; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为采样点的第 k 个自变量的系数; ϵ_i 为随机误差项。

2 结果与分析

2.1 耕地利用生态效率时空格局分析

借助非期望产出超效率 SBM 模型,设定期望产出与非期望产出权重比为 1:1,测算得出 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省耕地利用生态效率,以 2005 年自然断点法的分类结果为依据,分为 5 个等级,即低效率区(0~0.50),较低效率区(0.50~0.86),中等效率区(0.86~1.22),较高效率区(1.22~1.53),高效率区(1.53~2.94)。

时间维度上,2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省的耕地利用生态效率均值分别为 0.92, 0.89, 0.91, 0.86,效率值在 0.9 上下波动。在 4 个年份中,面积占比最高的等级均为中等效率,占比最低均为高效率,低效率、较低效率与中等效率的面积占比均在 88%以上(表 4)。在 2005—2019 年,较高效率与高效率的面积占比从 8.9%增长到 10.9%,占比虽然略有提高但仍较低,陕西省耕地利用尚处于中等效率发展水平,还有较大提升发展空间。

表 4 陕西省 2005—2019 年耕地利用生态效率面积比重

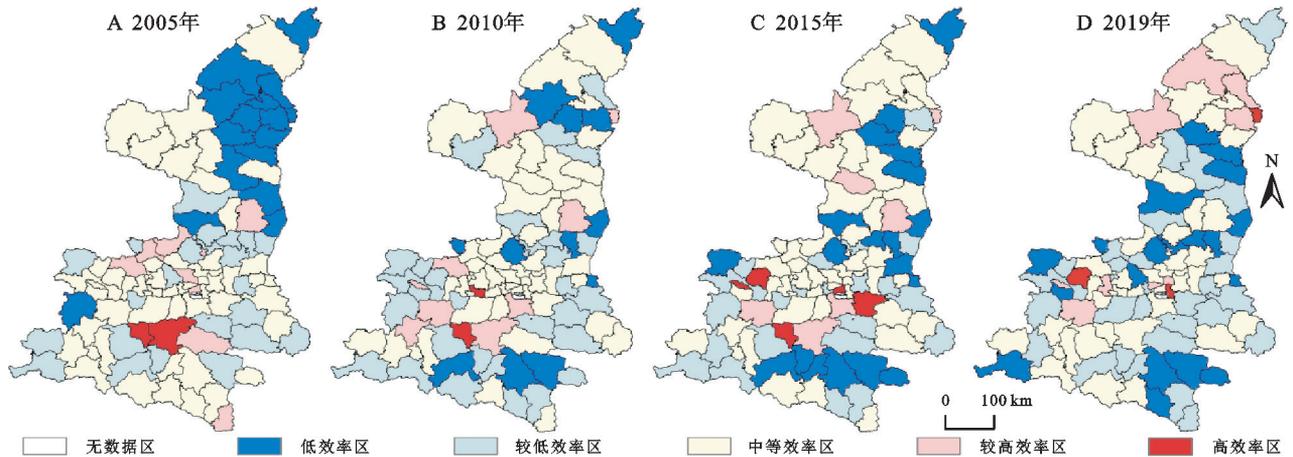
Table 4 Area proportion of cultivated land use eco-efficiency from 2005 to 2019 in Shaanxi Province

等级	效率值	面积比重/%			
		2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
低效率	0~0.50	20.67	13.23	18.78	17.28
较低效率	0.50~0.86	22.62	30.37	20.20	29.69
中等效率	0.86~1.22	47.81	45.80	49.57	42.10
较高效率	1.22~1.53	6.56	9.80	9.01	9.96
高效率	1.53~2.94	2.34	0.80	2.44	0.97

空间维度上,陕西省的耕地利用生态效率区域差异显著,空间分布不均衡(图 1)。2005 年高效率区集聚分布在陕南的宁陕县和佛坪县,低效率区较为集中分布在陕北东部的子洲县、米脂县和延川县等地,呈现“南高北低”的分布特征。此后 14 年,陕北地区黄土丘陵沟壑区和毛乌素沙地的生态治理工程成效显著,有效遏制水土流失,耕地利用的自然条件改善^[29]。陕南地区由于耕地破碎,农业机械化发展受阻^[15],导致效率低值区逐渐南移。2019 年高效率区

为凤翔区、灞桥区 and 吴堡县,分散分布在关中地区和陕北地区,低效率区有三大集中分布区,分别在陕北

南部的延川县和延长县等地、关中北部的白水縣和澄城县等地以及陕南南部汉滨区和白河县等地。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2021)6375 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 2005—2019 年陕西省耕地利用生态效率分布

Fig. 1 Distribution map of cultivated land use eco-efficiency in Shaanxi Province from 2005 to 2019

2.2 生态环境质量时空变化分析

陕西省遥感生态指数(RSEI)主成分分析结果表明第一主成分(PC1)中特征值贡献率均较高(表 5),因此以 PC₁ 构建陕西省遥感生态指数。根据已有研究^[30],将 RSEI 按照相等间隔划分为 5 个等级:低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)、高(0.8~1)。

表 5 遥感生态指数主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis results of remote sensing ecological index

年份	PC ₁ 特征值	PC ₁ 特征值贡献率/%
2005	3.71	92.86
2010	3.67	91.68
2015	3.77	94.18
2019	3.58	89.49

时间尺度上看,陕西省 2005—2019 年生态环境质量总体上呈现不断提高的趋势。2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省 RSEI 均值分别为 0.58, 0.62, 0.64, 0.65, 逐渐由中等水平提高至较高水平。在 2005—2019 年,低等级与较低等级的面积占比由 28.9% 降低至 13.1%(表 6),这说明陕西省实施的三北防护林等生态环境治理工程行之有效,低等级与较低等级区域主要分布在陕北黄土丘陵沟壑区和毛乌素沙地,东部黄土丘陵沟壑区主要实行“坡面退耕还林还草,沟道拦蓄整地,梁峁固土保水”的治理措施,西北部毛乌素沙地则以“沙地固沙还灌草,农区防风还林网”为主。

空间尺度上看,陕西省 2005—2019 年 RSEI 总体上保持“南高北低”的分布格局(图 2)。陕西省内 RSEI 高等级区域主要分布在陕南地区以及陕北南部的黄陵县等地,这些地区地处秦岭山区、黄龙山景区

和子午岭森林公园,以森林覆盖为主,绿度指数较高。低和较低等级区域主要分布陕北西北部的定边县等地,地处毛乌素沙地,湿度指数较低。将 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省生态环境质量分布图进行对比,得到 RSEI 变化情况(图 3)。总的来看,陕西省 RSEI 变化分布格局在 3 个时段内有较大的变化,RSEI 提高 0.1~0.5 主要分布在陕北地区的吴起县等地,降低 0.1~0.5 主要分布在关中地区的三原县等地。在 2005—2010 年,RSEI 变化以提高为主,少部分 RSEI 降低主要在关中地区的太白县等地,以及陕南地区的平利县等地;2010—2015 年与上一个时段相比,RSEI 降低地区面积有所增加,主要分布在关中地区的武功县等地,以及陕北地区的米脂县等地。2015—2019 年 RSEI 变化分布较为集中,质量降低地区面积继续扩大,集中分布在关中地区,陕南地区以及陕北南部的延长县和宜川县等地,质量提高地区集中分布在陕北地区的定边县等地。

表 6 陕西省 2005—2019 年遥感生态指数

Table 6 Remote sensing ecological index of Shaanxi Province from 2005 to 2019

等级	RSEI	面积比重/%			
		2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
低	0~0.2	5.78	2.20	3.57	0.57
较低	0.2~0.4	23.10	20.25	18.95	12.54
中等	0.4~0.6	18.96	18.57	18.81	27.54
较高	0.6~0.8	28.15	31.11	20.80	25.65
高	0.8~1.0	24.01	27.86	37.87	33.71

2.3 生态环境对耕地利用生态效率的响应

基于 GeoDa 软件测度 2005—2010 年、2010—

2015 年和 2015—2019 年陕西省耕地利用生态效率和 RSEI 指数双变量全局空间自相关 Moran's I 指

数,均通过了 5% 的显著性检验,且 Moran's I 均为正,表明两者存在显著的空间正相关(表 7)。

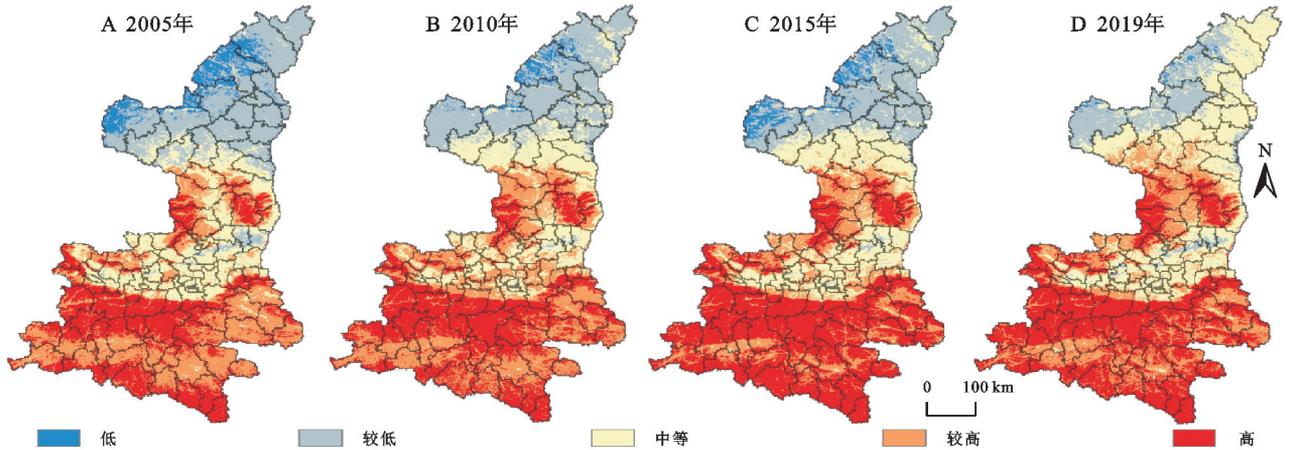


图 2 陕西省 2005—2019 年 RSEI 等级

Fig. 2 RSEI level of Shaanxi Province from 2005 to 2019

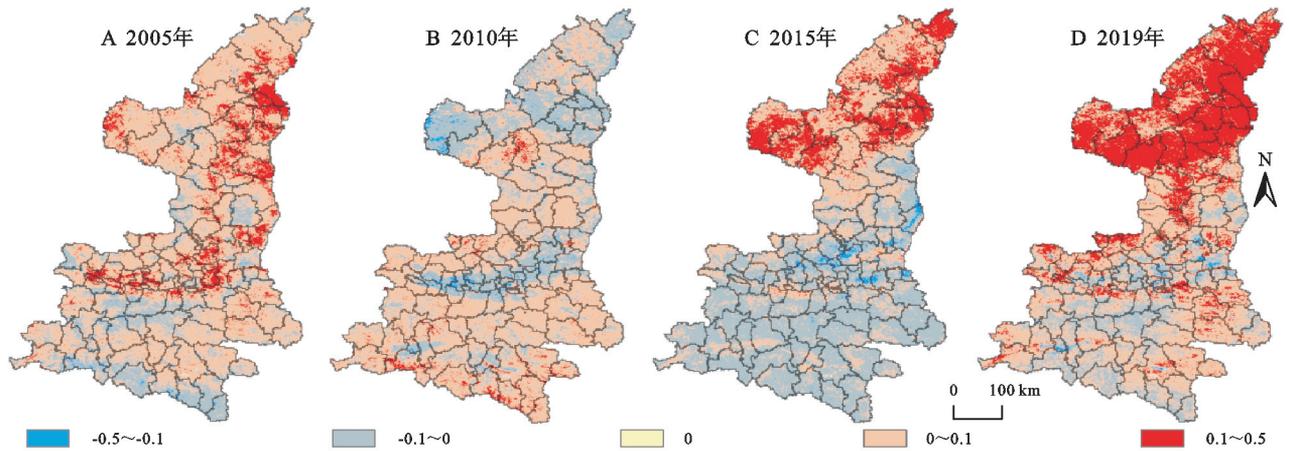


图 3 陕西省 2005—2019 年 RSEI 变化

Fig. 3 Changes of RSEI in Shaanxi Province from 2005 to 2019

表 7 双变量全局空间自相关 Moran's I 指数

Table 7 Bivariate global space autocorrelation Moran's I index

年份	Moran's I	p 值
2005—2010	0.38	0.001
2010—2015	0.12	0.003
2015—2019	0.22	0.001

为了探究陕西省内部生态环境对耕地利用生态效率的响应方式和程度,选取 2005—2010 年、2010—2015 年和 2015—2019 年耕地利用生态效率数据和 RSEI 数据,以 RSEI 变化值为因变量,以耕地利用生态效率变化值为解释变量,利用 ArcGIS 10.7 软件 GWR 工具计算回归系数,相关参数与结果见表 8。

表 8 GWR 模型参数估计及检验结果

Table 8 GWR model parameter estimation and test results

年份	带宽	残差平方和	有效数量	残差估计标准差	修正后赤池信息量准则	决定系数	调整决定系数
2005—2010	1.26	0.07	16.12	0.03	-455.12	0.46	0.38
2010—2015	0.89	0.06	25.67	0.03	-454.43	0.48	0.32
2015—2019	0.98	0.04	21.55	0.02	-503.40	0.84	0.80

从时间变化来看,2005—2019 年 RSEI 和耕地利用生态效率的关系模式并不稳定,在 3 个时段内变化较大。2005—2010 年,回归系数以负相关关系为主。2010—2015 年与上一时段相比,正相关关系扩大,主要原因在于 2012 年党的十八大将生态文明建设纳入

“五位一体”总体布局,陕西省政府大力推进农业污染减排工作,加快促进绿色农业发展,实现耕地利用和生态环境和谐发展,但耕地利用与生态环境保护协同发展模式尚不稳定还需进一步探索与巩固。2015—2019 年,回归系数变为负向为主。

从空间分布来看,陕西省耕地利用生态效率与 RSEI 的回归系数分布空间差异较大(图 4)。2005—2010 年,耕地利用生态效率变化与 RSEI 变化的回归系数总体表现为强负相关关系,强负相关关系主要分布在陕北北部的府谷县、榆阳区、靖边县,关中南部的太白县、周至县和陕南地区的镇巴县等地,强正相关关系主要集中在关中地区的合阳县、富平县、临潼区和金台区。2010—2015 年回归系数总体

表现为正相关关系,强正相关关系集聚在关中北部的永寿县等地,较上一时段,这一时段负相关关系地区大幅减少且分布更为集中,主要分布在陕北地区的定边县和关中地区的岐山县等地。2015—2019 年总体为弱负相关关系,与 2005—2010 年相比负相关程度较轻,强负相关关系分散分布在陕北东南部的延长县和关中北部的富平县等地,强正相关关系分布在志丹县和杨陵区。

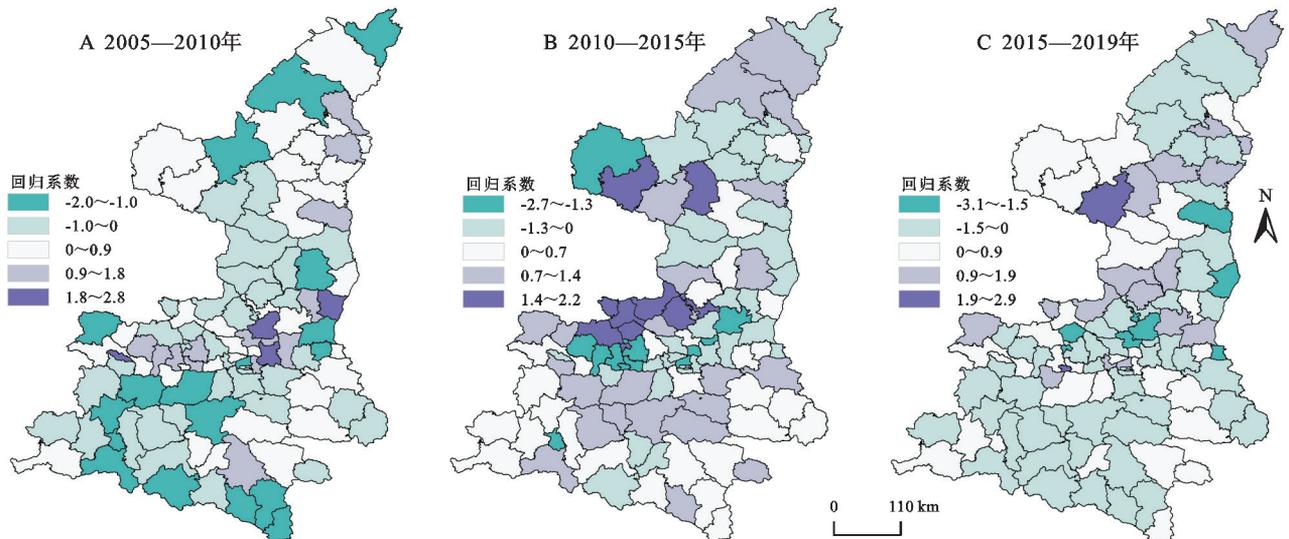


图 4 GWR 模型回归系数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of regression coefficients of GWR model

3 讨论

陕西省耕地利用生态效率对生态环境质量的影响具有空间不均衡性。研究发现三大区域生态环境对耕地利用生态效率的响应程度与演变趋势有所差异,主要原因在于三大区域的自然条件和社会经济状况不同。为实现不同区域农业高质量发展,提出以下几点建议:(1) 关中地区是陕西省重要的粮食主产区之一,同时也是城镇化水平较高区域,人口相对密集,建设用地明显增加^[31],部分地区人地矛盾突出,生态系统超载,耕地利用生态效率对生态环境质量有明显的负向影响。由于关中地区独特的自然环境和良好的区位优势,建议适度推进“农旅融合”模式,大力发展绿色农业和观光农业。(2) 陕北黄土高原地区生态环境质量低,由于实施三北防护林等生态修复工程,生态环境逐渐改善,耕地利用生态效率提高,发展潜力大,部分县市实现耕地利用和生态环境协同发展。在“产学研用”模式下,可以推动农业产业科技发展,实现农业增产、农民增收、农业科技进步。在生态环境承载力下,可适度激发耕地利用潜力。(3) 陕南地区地处秦岭生态保护区,耕地面积少且破碎化程度较高,农业现代化发展进程缓慢,生态环境对耕地利用生态效率的响应方

式不稳定。建议结合地形特点和良好生态资源优势,发展菌类、茶类、中药材等特色产业,持续探索“两山”理论和“两化”模式在陕南的推广运用。

4 结论

(1) 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省耕地利用生态效率属于中等效率水平,2019 年陕西省低效率、较低效率和中等效率区域的面积比重为 89.07%,较高效率和高效率区域仅占 10.93%,全省耕地利用水平较低,农业现代化发展水平有较大发展空间。

(2) 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年陕西省 RSEI 均值分别为 0.58, 0.62, 0.64, 0.65, 陕西省生态环境质量由中等水平提高至较高水平。省内 RSEI 高等级主要分布在陕南地区和陕北南部的黄龙山景区与子午岭森林公园地区;陕北地区生态治理工程效果显著,生态环境质量在不断提高。

(3) 全局莫兰指数结果显示陕西省 RSEI 和耕地利用生态效率存在显著的空间正相关。地理加权回归模型分析结果显示,陕西省生态环境对耕地利用生态效率的响应模式并不稳定,区域差异和时间变化较大。

由于时间和数据所限,本文研究仍存在不足之处,在使用非期望产出超效率 SBM 模型测算耕地利

用生态效率中,默认期望产出和非期望产出的权重比为1:1,未考虑区域和时代的差异性。如何选取期望产出指标,以及如何设置期望产出和非期望产出权重比还需要进一步探讨。

参考文献 (References):

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国生态环境状况与生态文明建设[J].生态学报,2016,36(19):6328-6335.
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The ecological environment conditions and construction of an ecological civilization in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (19):6328-6335.
- [2] 高江波,刘路路,郭灵辉,等.气候变化和物候变动对东北黑土区农业生产的协同作用及未来粮食生产风险[J].地理学报,2022,77(7):1681-1700.
Gao J B, Liu L L, Guo L H, et al. Synergic effects of climate change and phenological variation on agricultural production and its risk pattern in black soil region of Northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77 (7):1681-1700.
- [3] 刘彦随,乔陆印.中国新型城镇化背景下耕地保护制度与政策创新[J].经济地理,2014,34(4):1-6.
Liu Y S, Qiao L Y. Innovating system and policy of arable land conservation under the new-type urbanization in China [J]. Economic Geography, 2014, 34(4):1-6.
- [4] 王宇白,耿佳,周宇宇,等.中国北方地区生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应[J].测绘通报,2022(8):14-21,35.
Wang Y B, Geng J, Zhou Y Y, et al. Spatio-temporal evolution of eco-environment quality and the response to climate change and human activities in northern China [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(8):14-21,35.
- [5] Gottschalk T K, Dittrich R, Diekötter T, et al. Modelling land-use sustainability using farmland birds as indicators [J]. Ecological Indicators, 2010, 10(1):15-23.
- [6] Kim J H. Linking land use planning and regulation to economic development: A literature review [J]. Journal of Planning Literature, 2011, 26(1):35-47.
- [7] 陈丹玲,卢新海,匡兵.基于随机森林的耕地利用效率测度模型构建及其应用[J].自然资源学报,2019,34(6):1331-1344.
Chen D L, Lu X H, Kuang B. Measurement of cultivated land utilization efficiency: Construction and application of random forest [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6):1331-1344.
- [8] 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 L Y, Zhang R H, Pan Z C, 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]. Chinese Land Science, 2022, 36(3):74-85.
- [9] 梁流涛.考虑“非意欲”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,2012,34(12):2249-2255.
Liang L T. Agricultural land efficiency and temporal-spatial characteristics: Desired output and undesired pollution emissions [J]. Resources Science, 2012, 34 (12):2249-2255.
- [10] 匡兵,卢新海,韩璟,等.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,2018,34(11):1-8.
Kuang B, Lu X H, Han J, et al. Regional differences and dynamic evolution of cultivated land use efficiency in major grain producing areas in low carbon perspective [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11):1-8.
- [11] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.
Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5):889-897.
- [12] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J].生态学报,2023,43(5):2114-2127.
Zhang J, Yang L P, Gong E J, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in xi'an based on GEE and adjusted RSEI [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5):2114-2127.
- [13] 周晓艳,何依依,黄欣,等.三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J].农业工程学报,2021,37(11):259-267.
Zhou X Y, He Y Y, Huang X, et al. Topographic gradient effects of habitat quality and its response to land use change in Hubei Section of the Three Gorges Reservoir [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11):259-267.
- [14] 和娟,师学义,付扬军,等.汾河源头区域土地利用及生境质量时空演变的多情景模拟[J].水土保持研究,2020,27(5):250-258.
He J, Shi X Y, Fu Y J, et al. Multi-scenario simulation of spatiotemporal evolution of land use and habitat quality in the source area of Fenhe River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5):250-258.
- [15] 杨华,芮昉,李炬霖,等.陕西省农业现代化水平时空特征及障碍因素[J].资源科学,2020,42(1):172-183.
Yang H, Rui Y, Li J L, et al. Spatiotemporal characteristics of agricultural modernization level and obstacles in Shaanxi Province [J]. Resources Science, 2020,

- 42(1):172-183.
- [16] 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,2021,35(2):50-60.
Liu M B, Zhang A L, Wen G H. Temporal and spatial pattern and evolution trend of cultivated land use ecological efficiency in the main grain producing areas in the lower Yangtze region [J]. China Land Science, 2021,35(2):50-60.
- [17] 王修兰.二氧化碳、气候变化与农业[M].北京:气象出版社,1996.
Wang X L. Carbon Dioxide, Climate Change and Agriculture[M]. Beijing: China Meteorological Press,1996.
- [18] 韩召迎,孟亚利,徐娇,等.区域农田生态系统碳足迹时空差异分析:以江苏省为案例[J].农业环境科学学报,2012,31(5):1034-1041.
Han Z Y, Meng Y L, Xu J, et al. Temporal and spatial difference in carbon footprint of regional farmland ecosystem: Taking Jiangsu Province as a case[J]. Journal of Agro-Environment Science,2012,31(5):1034-1041.
- [19] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究[J].自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
Tian Y, Zhang J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(8):1298-1309.
- [20] 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(1/3):217-232.
- [21] 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,2011,21(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[J]. China Population, Resources and Environment,2011,21(8):80-86.
- [22] 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 F L, Li L, Zhang H L, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology,2007,26(12):2035-2039.
- [23] 王智平.中国农田 N₂O 排放量的估算[J].农村生态环境,1997,13(2):51-55.
Wang Z P. Estimation of Nitrous Oxide emission of farmland in China[J]. Rural Ecological Environment,1997,13(2):51-55.
- [24] 于克伟,陈冠雄,杨思河,等.几种旱地农作物在农田 N₂O 释放中的作用及环境因素的影响[J].应用生态学报,1995,6(4):387-391.
Yu K W, Chen G X, Yang S H, et al. Role of several upland crops in N₂O emission from farmland and its response to environmental factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,1995,6(4):387-391.
- [25] 庞军柱,王效科,牟玉静,等.黄土高原冬小麦地 N₂O 排放[J].生态学报,2011,31(7):1896-1903.
Pang J Z, Wang X K, Mu Y J, et al. Nitrous oxide emissions from winter wheat field in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(7):1896-1903.
- [26] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等.种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J].中国农业科学,2002,35(9):1104-1108.
Xiong Z Q, Xing G X, H Tsuruta, et al. The effects of summer legume crop cultivation on nitrous oxide emissions from upland farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica,2002,35(9):1104-1108.
- [27] 王少彬,苏维瀚.中国地区氧化亚氮排放量及其变化的估算[J].环境科学,1993,14(3):42-46,92-93.
Wang S B, Su W H. Estimation of nitrous oxide emission and its future change in China[J]. Environmental Science,1993,14(3):42-46,92-93.
- [28] 邱炜红,刘金山,胡承孝,等.种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究[J].生态环境学报,2010,19(12):2982-2985.
Qiu W H, Liu J S, Hu C X, et al. Comparison of Nitrous Oxide emission from bare soil and planted vegetable soil[J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(12):2982-2985.
- [29] 牛丽楠,邵全琴,宁佳,等.黄土高原生态恢复程度及恢复潜力评估[J].自然资源学报,2023,38(3):779-794.
Niu L N, Shao Q Q, Ning J, et al. Evaluation on the degree and potential of ecological restoration in Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources,2023,38(3):779-794.
- [30] 李妍,张国钦,齐涛,等.乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究:以天津市蓟州区为例[J].生态学报,2022,42(2):474-486.
Li Y, Zhang G Q, Lin T, et al. The spatiotemporal changes of remote sensing ecological index in towns and the influencing factors: A case study of Jizhou District, Tianjin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2):474-486.
- [31] 岳杻筱,薛亮.陕西省土地利用与生态系统服务价值动态研究[J].中国农业大学学报,2020,25(10):20-30.
Yue Y X, Xue L. Study on the dynamics of land use and ecosystem services value in Shaanxi Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(10):20-30.