

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.039.

奥勇, 张亦恒, 王晓峰, 等. 基于景观指数的关中地区耕地细碎化程度的时空变迁及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 401-411.

Ao Yong, Zhang Yiheng, Wang Xiaofeng, et al. Spatiotemporal Changes and Driving Factors of Cultivated Land Fragmentation in Guanzhong Region Based on Landscape Index[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 401-411.

基于景观指数的关中地区耕地细碎化程度的 时空变迁及其驱动因素

奥勇^{1,2,3}, 张亦恒^{1,3}, 王晓峰^{1,4}, 吴京盛⁴

(1. 长安大学 土地工程学院, 西安 710054; 2. 长安大学 资源学院地理信息研究所,
西安 710054; 3. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054; 4. 长安大学 资源学院, 西安 710054)

摘要: [目的] 优化陕西耕地细碎化治理, 协调粮食需求增长与环境约束之间的矛盾, 维护地区粮食安全和促进农业现代化发展。 [方法] 以关中地区为研究区, 以土地利用数据和其他自然经济数据为基础, 运用洛伦兹曲线、变异系数法、景观指数、空间自相关等方法构建耕地细碎化评价模型以探索关中地区耕地细碎化 (Cultivated Land Fragmentation, 简称 CLF) 的时空变迁, 并利用地理探测器对区内 CLF 进行了驱动力分析。 [结果] (1) 关中地区耕地资源空间分布相对均衡, 耕地专业化程度保持较高水平。(2) 关中地区的 CLF 程度变化时空差异显著, CLF 程度整体呈现下降态势, 但部分地区 CLF 程度呈增减并存趋势, 整体呈现东低西高的态势。(3) 关中地区 CLF 时空分化受多种因素影响, 社会经济因素的综合影响明显强于自然因素, 其中海拔高度、人口密度、人均耕地面积和地区总产值 GDP 为主要影响因素; 因子间的交互作用效应强于单因子, 以双因子增强和非线性增强为主。 [结论] 关中地区耕地细碎化问题在 20 年间得到了一定程度的改善, 但呈现出较大的地区差异, 应进一步在社会经济因素方面对耕地细碎化现象加强综合治理, 以推动关中地区农业机械化、现代化发展。

关键词: 耕地细碎化; 耕地细碎化时空变迁; 地理探测器; 景观指数; 关中地区

中图分类号: F301.21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0401-11

Spatiotemporal Changes and Driving Factors of Cultivated Land Fragmentation in Guanzhong Region Based on Landscape Index

Ao Yong^{1,2,3}, Zhang Yiheng^{1,3}, Wang Xiaofeng^{1,4}, Wu Jingsheng⁴

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Geographic Information, College of Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Land Consolidation of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China; 4. College of Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to optimize the fine management of cultivated land in Shaanxi Province, to coordinate the contradiction between food demand growth and environmental constraints, to maintain regional food security, and to promote agricultural modernization. [Methods] The Guanzhong area was taken as the research area. Based on land use data and other natural economic data, Lorentz curve, coefficient of variation method, landscape index, spatial autocorrelation and other methods were used to construct an evaluation model of cultivated land fragmentation to explore the temporal and spatial changes of cultivated land fragmentation (CLF) in Guanzhong area, and geographic detectors were used to analyze the driving force of CLF in the area. [Results] (1) The spatial distribution of cultivated land resources in Guanzhong area was relatively balanced, and the degree of cultivated land specialization remained

收稿日期: 2023-06-02

修回日期: 2023-06-15

资助项目: 陕西省土地整治重点实验室开放基金“污染调查与评估研究损毁土地遥感技术”(2018-JC08); 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室开放基金(SXDJ2019-03); 国家重点研发计划“国家生态屏障区生态系统动态演变特征”(2018YFC0507301-2)

第一作者: 奥勇(1963—), 男, 陕西富平人, 副教授, 主要从事遥感科学与技术方面的研究。E-mail: aoyong@chd.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

at a high level. (2) The spatial and temporal differences in the degree of CLF in Guanzhong region were significant, and the overall degree of CLF showed a downward trend, but the degree of CLF in some areas showed a trend of increasing and decreasing, and the overall trend was low in the east and high in the west. (3) The spatiotemporal differentiation of CLF in Guanzhong region was affected by many factors, and the comprehensive influence of socio-economic factors was significantly stronger than that of natural factors, among which altitude, population density, per capita arable land area and regional GDP were the main influencing factors. The interaction effect between factors was stronger than that of single factor, and two-factor enhancement and nonlinear enhancement were the mainstay. [Conclusion] The problem of cultivated land fragmentation in Guanzhong area has been improved to a certain extent in the past 20 years, but there are large regional differences, and the comprehensive management of cultivated land fragmentation should be further strengthened in terms of social and economic factors, so as to promote the development of agricultural mechanization and modernization in Guanzhong area.

Keywords: cultivated land fragmentation; temporal and spatial changes; geographic detector; landscape pattern index; Guanzhong area

耕地资源是农业生产的基石,是人类生存和社会发展的基本资源,对于粮食和生态安全的维护以及促进农业现代化发展起到了重要作用^[1-3]。耕地细碎化(*Cultivated Land Fragmentation*, 简称 CLF)指由于自然因素或者人为因素而导致耕地资源分布成分散并且大小不均的斑块,导致耕地难以进行大规模集中管理的状态^[4]。CLF 是一种特殊的土地利用格局,它是农业可持续发展面临的问题,也是世界土地利用的普遍现象,主要存在于人多地少、人地矛盾突出的国家,如中国、印度和一些中欧东欧国家^[5-6]。耕地细碎化会造成农业经营成本升高^[7-9],农村土地利用效率低下以及农村劳动力减少^[3,7,10],间接导致各种类型的土地退化低效等问题^[6],此外,耕地细碎化还会引起生物多样性降低,局部微气候变化等一系列不良的生态后果,导致农业生态系统提供服务的减少,进一步阻碍中国农业现代化^[11]。耕地细碎化的现象长期存在于中国的农业发展中,自从 1978 年中国实行家庭联产承包责任制开始,土地资源在公平分配时需要存在差异的土地肥力和地理位置进行平衡,这就导致土地更加分散和细碎,耕地细碎化进一步恶化^[12-13]。21 世纪以来无序扩张的城镇建设用地以及社会经济快速发展带来的人地矛盾加剧,迫使土地利用发生变化,耕地细碎化加剧^[14-15]。因此,科学评估区域的耕地细碎化水平对提高区域耕地利用率,保障区域粮食安全有着积极的意义。

目前,关于 CLF 在耕地使用、耕地流转、耕地景观结构等方面已经取得了丰硕的成果^[3,16-22]。文献表明,景观指标可以有效地将耕地细碎化现象具象化^[23],目前关于 CLF 评价的相关研究大多采用景观格局指数来表征 CLF 的程度,大多数学者在 CLF 评

价研究中采用主成分分析法来消除各景观指数之间的相关性,但很少考虑景观格局指数中的多共线性,当存在高度相关的自变量时,会使得判定每一个单独的自变量对需求的影响程度非常困难,这对评价结果的准确性有一定的影响。而在 CLF 的驱动力研究中,学者们主要探讨了人口密度、道路交通、土地产权等社会经济因素以及海拔、坡度、年降水量等自然因素对 CLF 的影响,但他们大都使用地理加权回归模型来确定 CLF 的影响因素^[24-27]。并且仅对 CLF 的影响因素进行了宏观定性分析,而没有对各因素的影响进行具体量化,也仅分析了每个因素的个体效应,但尚未探索各影响因素之间的相互作用。陕西农业现代化发展水平长期滞后于全国平均水平,加快推进农业现代化是陕西在“十四五”期间的重要任务。而 CLF 是阻碍区域农业现代化的重要因素且关于 CLF 的研究在陕西地区较少,所以探究关中地区耕地细碎化程度的时空变迁以及其驱动因素能够为推进地区农业发展和保证耕地资源可持续利用提供参考。

1 研究区概况

本论文选取关中地区作为研究区,关中地区位于中国大陆内陆腹地的陕西省中部,辖“五市一区”,包括西安市、宝鸡市、咸阳市、渭南市、铜川市和杨凌农业高新技术产业示范区(图 1)。关中地区位于东经 106.3°—110.6°,北纬 33.6°—35.8°。海拔平均 500 多米,东西跨度 360 多 km,总面积为 5.6 万 km²,地区平坦耕地数量多、比例高且土壤肥沃。2020 年陕西统计年鉴数据显示关中平原的耕地共有 1 409.76 hm²,占全省耕地的 46.83%,2019 年粮食总产量为 6 895.8 kt,占全省粮食总产量的 56.01%,人口 2 459.12 万人,占全省人口的 63.44%。

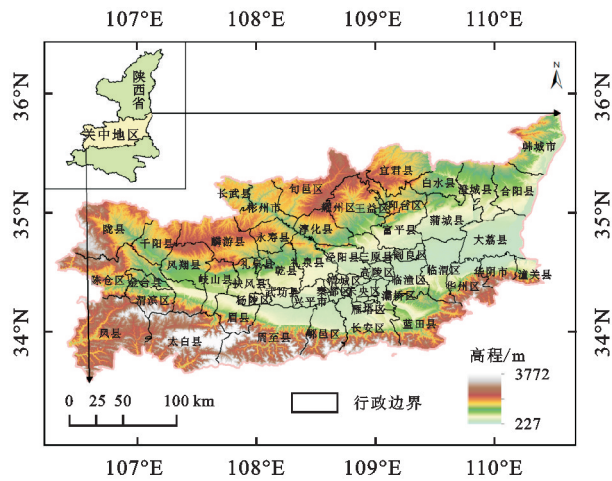


图 1 陕西省关中地区概况图

Fig. 1 Overview map of Guanzhong region of Shaanxi Province

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究使用的 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地利用遥感监测数据、归一化植被指数 (NDVI)均来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)。其中,土地利用数据空间分辨率 30 m,土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地、未利用地、6 种一级类型。NDVI 数据由 2000 年、2005 年 Landsat-TM 卫星图像以及 2010 年、2015 年、2020 年 Landsat 8 OLI 卫星影像处理而成,空间分辨率为 30 m。海拔数据是使用来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)的 30 m 分辨率 DEM 数据获得的。人口密度数据来自 WorldPop(<https://www.worldpop.org>),分辨率为 1 000 m。降水量数据来自美国国家大气研究中心 (NCAR),分辨率为 0.008 333°,约 1 000 m。GDP km 网格数据来源于全球变化科学研究所,分辨率为 100 m。2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年道路网和水系网分布数据来源于微图。各项数据精度均满足本研究所需,最终对数据进行指标标准化处理和分级以统一到同一尺度进行相关性分析。

2.2 研究方法

2.2.1 探究关中地区各县区耕地分布情况和专业化程度

(1) 洛伦兹曲线。近年来,越来越多的研究将洛伦兹曲线引入耕地资源变化、粮食安全等方面的研究^[28-29]。利用洛伦兹曲线对 2000—2020 年关中地区耕地空间分布集中度进行具体分析。计算公式如下:

$$Q=\frac{P_1/P_2}{P_3/P_4}$$

(1)

式中:Q 是耕地的位置熵,又称专业化率;P₁是一个县的耕地面积;P₂是研究区耕地总面积;P₃是一个县

的土地总面积;P₄是总土地面积。Q 值可以反映耕地分布的平衡程度。当 Q<1 时,表示县内耕地面积比重小于研究区土地总面积比重,即专业化程度低,县域处于劣势。否则,当 Q>1 时,表明具有高度的专业化程度,是区域优势。

根据等式(1),计算耕地的位置熵 Q,计算各县耕地面积和土地面积的累计百分比,然后以各县土地面积的累计百分比为水平坐标,以耕地面积的累计百分比纵坐标,绘制洛伦兹曲线。

(2) 基尼系数。基尼系数用于描述研究领域研究对象空间分布的均匀性^[30],并量化洛伦兹曲线。计算公式如下:

$$G=\sum_{i=1}^{m-1}(P_iQ_{i+1}-P_{i+1}Q_i)$$

(2)

式中:G 是基尼系数;P_i表示一个县的土地面积在研究区域总土地面积中的累积百分比;Q_i表示一个县的耕地面积在研究区总耕地面积中的累积百分比。当 G<0.2 时,均匀程度好;0.2<G<0.3,均匀程度较好;0.3<G<0.4,均匀程度适中;0.4<G<0.6,均匀程度较差;而 G>0.6,均匀程度差。

2.2.2 基于景观格局的耕地细碎化评价

(1) 耕地细碎化指标的选取。CLF 的程度受不同因素的影响,如地块的形状、大小和连通性,不能简单地用单一维度指数来描述。本研究借鉴已有的研究成果^[3,27-29,31-34],综合考虑耕地的平均面积、形状和分布等因素,从大小、边缘形状、聚集 3 个方面选取 10 个景观指标,对关中地区 CLF 程度进行了表征。10 个景观指标分别为斑块密度(PD)、平均地块面积指数(AREA_MN)、斑块数量破碎化指数(FN)、边界密度指数(ED)、面积加权平均形状指数(SHAPE_AM)、面积加权平均斑块面积(AREA_AM)、散布和并置指数(IJI)、斑块内聚指数(COHESION)和聚合指数(AI)、景观分裂度指数(DIVISION)。

为了减少冗余指标并提高评估模型的准确性,应用方差膨胀因子(VIF)进行测试。当 VIF>10 时,表示该变量的多重共线性非常严重,应考虑移除该变量^[35]。各种景观指标的多共线性诊断结果显示在表 1。

根据上述测试结果,最终去除 VIF>10 的聚合指数(AI)和面积加权平均斑块面积(AREA_AM)两个因子,以保持评价结果的准确性。每个景观指标的计算方程和生态意义显示在表 2。

(2) 指标标准化以及权重的确定。极差标准化法:景观指标存在单位、量纲不统一,缺乏科学可比性,因此采用极差标准法对原始数据进行无量纲化处理,将正负属性指标统一转化为正值的标准化指标,

计算公式如下：

正指标：

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \tag{3}$$

负指标：

$$Z_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \tag{4}$$

式中： X_{ij} 表示指标实际值； Z_{ij} 表示指标标准化值，其值域为[0,1]。

变异系数法：

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \tag{5}$$

式中： W_i 为指标*i*的权重； V_i 为指标*i*的变异系数；*n*表示指标数量。

综合因子评价法：

$$Y_j = \sum_{i=1}^n k_{ji} \omega_i \tag{6}$$

式中： Y_j 为第*j*个评价单元的耕地细碎化指数； k_{ji} 表示第*j*个评价单元第*i*个评价指标的指标值； ω_i 表示第*i*个指标的权重大小；*n*表示指标个数。

表 1 景观指标的多共线性诊断表

Table 1 Multicollinearity diagnostic table of landscape indicators

指标	PD	ED	DIVISION	SHAPE_AM	IJI
VIF	4.358	3.104	4.086	4.165	1.587
指标	FN	AI	COHESION	AREA_AM	AREA_MN
VIF	5.3	12.572	7.071	10.232	1.528

表 2 耕地细碎化指数及其描述

Table 2 Cultivated land fragmentation index and its description

类型	景观指数	计算公式	指标说明
面积与边缘指标	边缘密度(ED)	$ED = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m P_{ij}}{A}$ 式中： P_{ij} 是 <i>i</i> 和 <i>j</i> 景观元素之间的边界长度	指按单元边界划分的景观类型分割程度，值越大，此类元素的景观模式就越分散
	斑块平均大小(AR-EA_MN)	$AREA_MN = \frac{A}{NP}$ 式中： <i>A</i> 是总景观区域； <i>NP</i> 是景观中的斑块数	反映了景观结构分析中某一类景观的碎片化程度。值越高，碎片化程度越低
形状指标	面积加权的平均形状指数(SHAPE_AM)	$SHAPE_AM = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{0.25 P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$ 式中： a_{ij} 指第 <i>i</i> 类景观中第 <i>j</i> 个斑块的面积(m^2)； p_{ij} 代表第 <i>i</i> 类景观中第 <i>j</i> 个斑块的周长(<i>m</i>)	反映了斑块形状的复杂程度
聚集指标	景观分离度(DIVISION)	$DIVISION = - \sum_{j=1}^m \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2$ 式中： <i>m</i> 表示景观 <i>i</i> 类型中的元素个数； a_{ij} 为第 <i>i</i> 类景观的面积； <i>A</i> 为景观总面积	指某一景观类型中不同元素个体分布的分离程度。分离度越大，表明景观在地域上分布越分散
	斑块内聚力指数(COHESION)	$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^m P_{ij}}{\sum_{j=1}^m P_{ij} \times \sqrt{a_{ij}}} \right] \times \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \times 100$ 式中： a_{ij} 指第 <i>i</i> 类景观中第 <i>j</i> 个斑块的面积(m^2)； P_{ij} 代表第 <i>i</i> 类景观中第 <i>j</i> 个斑块的周长(<i>m</i>)； <i>A</i> 为该景观的总面积(hm^2)	表示不同类型斑块之间的团聚程度，价值越大，这类景观的碎片化程度越低
	散布与并列指数(IJI)	$IJI = \frac{- \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \left[\frac{E_{ij}}{E} \ln \frac{E_{ij}}{E} \right]}{\ln [0.5m(m-1)]}$ 式中： E_{ij} 是 <i>i</i> 和 <i>j</i> 之间的相邻边长度； <i>m</i> 是景观类型的总数； <i>E</i> 是整个景观的边缘长度	指某些元素与其他之间的相邻概率。该值越高，此类型的景观就越分散
	斑块密度(PD)	$PD = \frac{NP}{A}$ 式中： <i>NP</i> 为斑块数量； <i>A</i> 为景观的总面积(hm^2)； <i>PD</i> 为斑块密度，个/ hm^2	表示景观类型的斑块边界对整个景观的影响程度。该值越大，斑块景观中的分布就越集中
	破碎化指数(FN)	$FN = \frac{NP-1}{MPS}$ 式中： <i>NP</i> 为斑块数量； <i>MPS</i> 为斑块平均大小	表征景观被分割的破碎程度，在一定程度上反映了人类对景观的干扰程度

2.2.3 探究关中地区 CLF 的空间分布模式和聚类特征 空间自相关通常用于检测区域内地理数据之间潜在的相互依赖关系^[36]。引入局部莫兰指数统计量来测量 2000—2020 年关中地区 CLF 变化的空间自相关。局部莫兰指数 I 的计算公式为:

Local Moran's $I = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (7)$

$S^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \quad (8)$

式中: m 是县单位的数量; x_i 和 x_j 分别是空间单位属性的测量值; \bar{x} 是测量值的平均值;和 w_{ij} 是空间权重矩阵,并且 S^2 是它的方差。

2.2.4 探究关中地区耕地细碎化的影响因素 地理探测器是一种检测地理现象空间分异特征并揭示其影响的统计方法,它由因子检测,交互式检测,生态检测和风险检测组成^[37-38]。采用因子检测和交互式检测方法,区分关中地区 CLF 空间分化的驱动因素的影响,揭示驱动因素之间的相关性。计算方法如下:

$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \delta_i^2 \quad (9)$

式中: q 是驱动因子的影响, $q \in [0, 1]$; N 是样本数; i 是分区($i = 1, 2, \dots, L$);和 σ^2 和 σ_i^2 分别是指标的方差和分区 i 的方差。 q 的大小反映了指标的空间分化程度。 q 值越大,每个因子对因变量的解释能力越强,反之亦然。

本研究结合已有的研究和数据从自然资源禀赋和社会经济发展两个方面选取海拔(X_1)、坡度(X_2)、NDVI(X_3)、年降水量数据(X_7)、到道路的距离(X_4)、到河流的距离(X_5)六项影响因素^[1,27,39],但由于人口密度(X_6)、人均耕地面积(X_8)能够反映不同人类活动对耕地景观格局的干扰程度,GDP(X_9)体现了不同地区的经济技术水平,本文将三者加入到耕地细碎化现象影响因素指标之中。具体分类方法和说明见表 3。

3 结果与分析

3.1 关中土地资源时空分布平衡

为探讨关中区域耕地资源时空分布的平衡情况,绘制 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年关中地区耕地洛伦兹曲线,并计算各年的耕地基尼系数。图 2 表明,关中地区耕地洛伦兹曲线接近 2000—2020 年绝对平均线,5 个年份的洛伦兹曲线基本重合,变化范围较小,表明研究地区耕地资源空间分布相对分散。各年耕地基尼系数分别为 0.289,0.303,0.289,0.288,0.349,说明关中地区的耕地分布较为均

匀,整体数值在 2000—2015 年期间波动程度较小,而在 2015—2020 年期间有一定增长,说明该时间段耕地分布变得更为集中。根据 2000—2020 年关中地区各县(区)耕地位置熵的空间分布(图 3),关中地区 20 年期间 57%以上的县(区)耕地区位熵大于 1,表明整个研究区耕地专业化程度高。虽然整个研究区域位置熵呈现增减并存的现象,但增幅趋势占主导地位,表明研究期间关中地区的耕地专业化程度在逐步提高。

表 3 描述地理探测器的驱动因素分类

Table 3 Describes the driver classification of geographic detectors

类型	符号	驱动因子	分类方法	分类等级
自然因子	X_1	高程	自然断点	1~6
	X_2	坡度	自然断点	1~6
	X_3	NDVI	张丽等 ^[40]	1~5
	X_4	与河流的距离	自然断点	1~6
	X_7	年降水量	自然断点	1~6
人为因子	X_5	与道路的距离	自然断点	1~6
	X_6	人口密度	葛美玲等 ^[41]	1~5
	X_8	人均耕地面积	自然断点	1~6
	X_9	GDP	自然断点	1~6

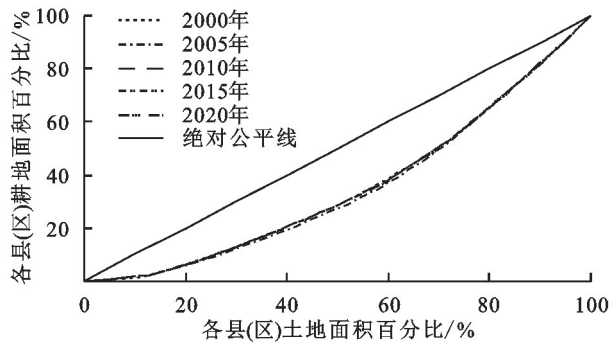


图 2 2000—2020 年洛伦兹曲线

Fig. 2 2000—2020 Lorentz curve

3.2 耕地细碎化的时空分布

由于本文以县(区)为基础研究单元,基础研究单元数量较多,自然断点分类法可以将各个类之间的差异最大化,因此用自然断点法将各个景观指数分为 6 个等级。由图 4 可知 2000—2020 年关中地区耕地景观指数 AREA_MN 和其余景观指数的空间分布差异较大。AREA_MN 指数在 2000—2015 年存在大面积高值地区,2015—2020 年期间咸阳、西安、渭南等城市有多数县(区)均有由高值向低值转变的现象,其中关中中部及东部地区等地区存在成片的下降的情况。COHESION 指数在研究期间的空间分布整体变化不大,高值区主要存在于关中东部的部分县(区),低值区则多分布于关中中东部地区。PD 在研究期间空间分布上变化较小,低值区主要集中于关

中中部及东部地区,中值和高值区则集中于研究区西部等海拔较高的地区。ED 的高价值区域集中在研究区北部,而低价值区域集中在一些南部县,整体变化也较为稳定,只有个别县区,如大荔县,研究期间在低中值之间来回变化。IJI 的空间分布存在一定变化,低值区分布广泛,少数中高值区域分散在凤县、陇县、潼关县、旬邑县、长武县等地区,但总体上高值地区

数量降低,其中宜君县、白水、澄城县在研究期间有从低值向高值转变然后又返回低值的变化。SHAPE_AM 的大部分地区都为中高值区域,但中值区域和高值区域的空间分布较为复杂,两者分布散落,交替分布,整体空间分布在研究期间变化不大,低值区由 4 个县降低到仅有渭滨区和太白县两个县(区),位于研究区西南部,永寿县和淳化县向高值区转变。

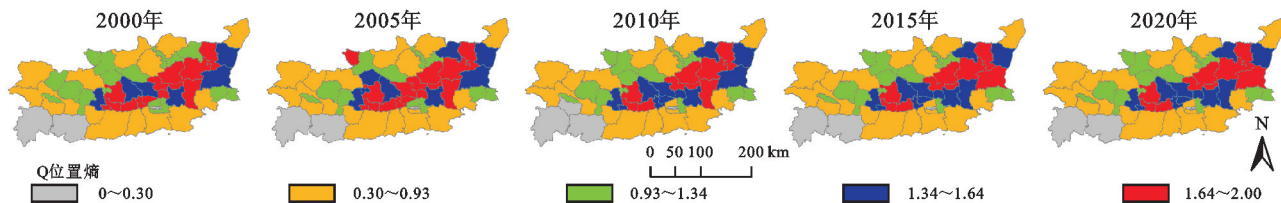


图 3 2000—2020 年关中地区耕地位置熵的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of cultivated land location entropy in Guanzhong from 2000 to 2020

3.3 耕地细碎化综合指标的时空分布特征

根据变异系数法对景观指数进行权重测定,最终得到 2000—2020 年关中地区耕地细碎化指数时空分布(图 5)。总体而言,关中地区耕地景观格局的空间异质性和复杂性相对较高。其中,关中地区北部和西部的耕地细碎化程度较高,而中部和东部的破碎化程度较低。研究期间 CLF 指数小于 0.2 的县域由 26 个增加到了 32 个,但 CLF 指数大于 0.25 的县域总数仍为 17 个,表明 CLF 总体上有一定程度的改善。2000 年西安市、渭南市和咸阳市南部地区的县(区) CLF 值处于 0.15~0.20 之间,少数县存在更高的破碎化程度,到 2020 年,这些地区大部分县(区)的 CLF 值都降低到了 0~0.15 区间,表明研究期间关中中部地区县(区)的耕地细碎化现象得到了明显的改善。研究区域的西部地区,在 2000 年 CLF 指数均大于 0.25,到 2020 年,该区域的 CLF 指数未改善,并且太白县和凤县这两个地区的耕地细碎化程度明显加深,由 2000 年的 0.34,0.34 增加到了 2020 年的 0.42,0.37,说明西部地区县(区)的耕地破碎化问题仍然亟待解决。2020 年陈仓区、千阳县等地区的县域破碎化程度有一定的下降,大部分县(区)的 CLF 指数从 0.15~0.20 区间下降到 0.10~0.15 区间。此外,值得注意的是,从 2000—2020 年,除潼关县和蓝田县以外,其他地区 CLF 指数大于 0.25 的县都集中成片存在。

3.4 耕地细碎化空间自相关

为进一步探讨 2000—2020 年关中地区 CLF 综合指数的时空分布特征,对研究期间流域 CLF 综合指数进行单因素局部空间自相关分析,生成空间关联 LISA 图局部指标,即 CLF 指数的聚合分布模式。在 LISA 图中,高一高、低一低、高一低、高一低四象限

县的 CLF 指数在 5% 水平上显著。为了更好地显示研究区各县的综合碎片化程度,图 6 所示:研究期间关中地区随机和集聚县的分布格局总体稳定。高一高区代表高值、高值的集聚区,集中在陈仓、凤县、渭滨等一些县域。该地区各县的海拔高度高于研究区内的大多数县,表明海拔高度对 CLF 产生了一定的影响。低一低区是指低值、低值集聚区,集中在关中中部地区的县域,主要包括秦都、未央、三原等。低一高区域表示低值被高值包围,这类地区分布较少,只有 2005 年和 2010 年的宝鸡市凤翔县属于该类别,该地区可能是 CLF 指数在研究区中部和西部的分界。高一低区域表示高值被低值包围,这种类型较少,在研究期间没有出现。

3.5 耕地细碎化的影响因素

本文基于地理探测器,探究 2000—2020 年关中地区 54 个县 CLF 指数的时空分布机制,总体看来,关中地区 CLF 的时空分化受社会经济因素的影响强于自然因素对关中地区 CLF 的影响(表 4)。9 项影响因素中,人口密度(X_6)、人均耕地面积(X_8)和地区总产值 GDP(X_9)3 个社会因素在各个年份都拥有较高的要素贡献率,而自然因素只有海拔高度(X_1)具有较高的因子贡献率,并且每个年份的社会因素总贡献率远大于自然因素的总贡献率。社会经济因素中,人口密度(X_6)、人均耕地面积(X_8)和地区总产值 GDP(X_9)三者的综合影响达到总要素贡献率的 40% 以上,明显强于其他社会经济因素。自然因素中,海拔高度(X_1)、坡度(X_2)以及降水量(X_7)对 CLF 的综合影响也达到了总要素贡献率的 35% 以上,而到路网的距离(X_4),到河流的距离(X_5)以及 NDVI(X_3)三者的贡献率较小。

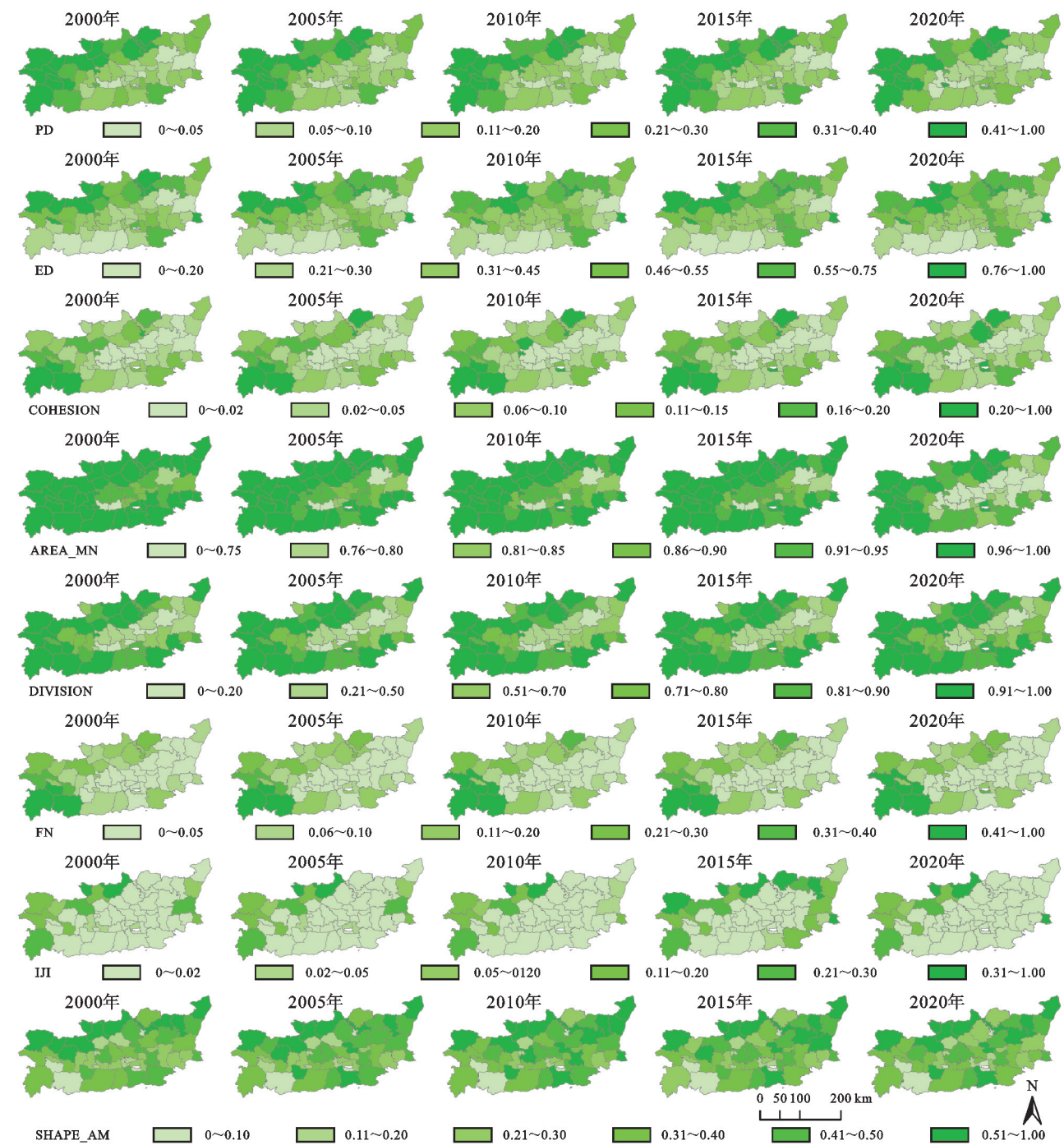


图 4 2000—2020 年各项景观指数分布

Fig. 4 Distribution of landscape indices from 2000 to 2020

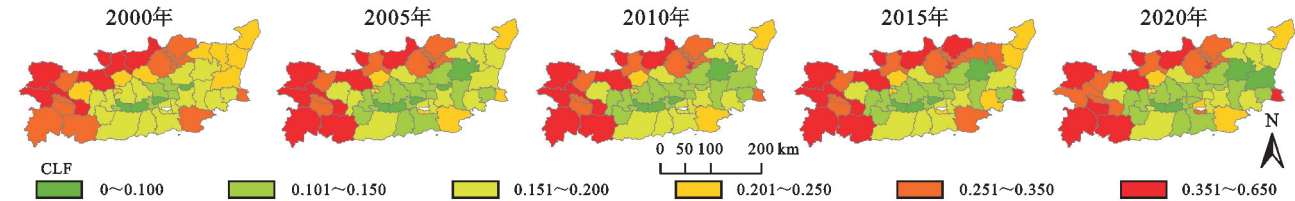


图 5 2000—2020 年关中地区耕地细碎化程度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of cultivated land fragmentation in Guanzhong area from 2000 to 2020

其中海拔高度和坡度对关中地区 CLF 的影响整体上呈现波动上升的趋势。降水量(X_7)和到河流的距离对研究区 CLF 的影响则逐年减小,这是因为随着研究区耕地灌溉与排水工程的建设,所以耕地对水体和自然降水的依赖则逐渐减弱。NDVI 对 CLF 影响呈逐年上升的趋势,这与快速城市化过程中植被覆

盖类型和土地利用结构的急剧变化密切相关。在研究期间,人口密度、人均耕地面积和 GDP 对 CLF 产生了较大影响,一方面,随着关中地区社会经济发展水平的提高,大量农村人口向经济比较发达的关中中部地区转移,人口的快速转移给耕地负荷带来了负

担,但随着地区人口饱和消费水平变高又人口密度也不断波动,因而人均耕地面积对 CLF 的影响不断波动。另一方面,随着经济的高速发展,以及区域对于高 GDP 的追求伴随着无序的城市扩张和不合理的土地开发利用,严重地影响了耕地景观格局。

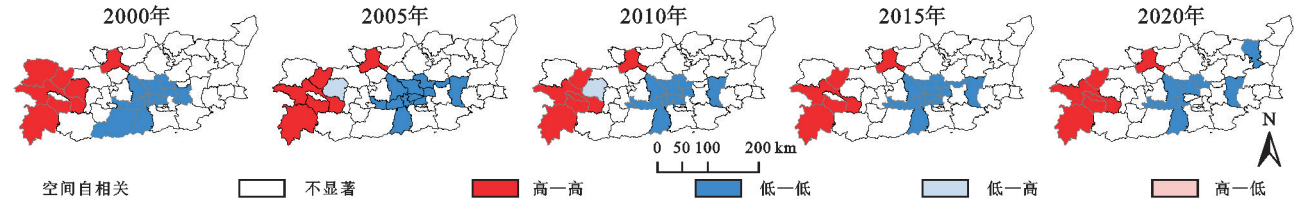


图 6 2000—2020 年关中耕地细碎化空间关联(LISA)地图局部指标

Fig. 6 Local indicators of the Spatial Association (LISA) map of cultivated land in Guanzhong from 2000 to 2020

表 4 2000—2020 年影响因子的贡献率

Table 4 Contribution rate of impact factor from 2000 to 2020

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
2000	0.374	0.101	0.042	0.070	0.072	0.340	0.285	0.323	0.501
2005	0.406	0.116	0.092	0.065	0.060	0.330	0.201	0.189	0.273
2010	0.468	0.163	0.163	0.065	0.062	0.356	0.242	0.254	0.267
2015	0.396	0.132	0.107	0.097	0.056	0.343	0.198	0.193	0.408
2020	0.424	0.154	0.155	0.062	0.050	0.317	0.158	0.440	0.231

本文筛选出了每年 10 个各项影响因素相互作用强度最高的交互类型来探求 CLF 的主要影响因素以及研究期间主要影响因素之间相互作用强度的变化。如表 5 所示,研究期间各影响因素对关中地区 CLF 的影响并不相互独立,且存在较强的相互作用因子间的相互作用明显强于单因子,其中双因子增强和非线性增强占大多数。具体来看,2000 年相互作用以双因子增强为主,主要相互作用因子强度达到 0.5 以上, GDP(X_9)和人均耕地面积(X_8)的相互作用强度最高,达到 0.716。2005 年,主要相互作用因子的相互作用强度存在一定的下降,非线性增强整体上得到了一定的增强,海拔高度(X_1)与人均耕地面积(X_8)的

交互作用强度最高,达到 0.537。2010 年,主要相互作用因子的作用强度得到了增强,并且返回到以双因子增强为主导的态势,海拔高度(X_1)与人均耕地面积(X_8)的交互强度高达 0.621。2015 年,双因素增强仍旧占主导地位,因子的相互作用强度变化不大, GDP(X_9)和人均耕地面积(X_8)的相互作用强度最高,达到 0.598。

表明人均耕地面积(X_8)和 GDP(X_9)对关中地区 CLF 起了重要作用,主要是因为研究区社会经济发展水平提高,人地矛盾加剧,城市扩张等不合理的人类活动,使得因素之间的相互作用更加复杂,进一步干扰了耕地的景观格局。

表 5 主要因素交互作用和变化

Table 5 Main factor interactions and changes

2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
交互类型	交互强度	交互类型	交互强度	交互类型	交互强度	交互类型	交互强度	交互类型	交互强度
$X_4 \cap X_9$	0.511 *	$X_1 \cap X_3$	0.417 *	$X_6 \cap X_7$	0.438 *	$X_4 \cap X_9$	0.441 *	$X_8 \cap X_9$	0.454 *
$X_5 \cap X_9$	0.513 **	$X_1 \cap X_2$	0.418 *	$X_3 \cap X_1$	0.475 *	$X_6 \cap X_1$	0.444 *	$X_8 \cap X_4$	0.457 *
$X_3 \cap X_9$	0.525 *	$X_8 \cap X_7$	0.420 **	$X_1 \cap X_4$	0.486 *	$X_2 \cap X_9$	0.457 *	$X_1 \cap X_5$	0.460 **
$X_6 \cap X_9$	0.541 *	$X_1 \cap X_4$	0.429 *	$X_6 \cap X_8$	0.488 *	$X_1 \cap X_7$	0.444 *	$X_5 \cap X_8$	0.460 **
$X_1 \cap X_9$	0.562 *	$X_1 \cap X_5$	0.437 **	$X_5 \cap X_1$	0.496 **	$X_7 \cap X_9$	0.462 *	$X_1 \cap X_9$	0.466 *
$X_8 \cap X_7$	0.568 *	$X_1 \cap X_7$	0.441 *	$X_7 \cap X_1$	0.498 *	$X_6 \cap X_9$	0.501 *	$X_8 \cap X_3$	0.493 *
$X_8 \cap X_6$	0.568 *	$X_1 \cap X_6$	0.451 *	$X_1 \cap X_6$	0.500 *	$X_6 \cap X_8$	0.519 **	$X_1 \cap X_7$	0.498 *
$X_9 \cap X_7$	0.592 *	$X_6 \cap X_8$	0.456 **	$X_1 \cap X_9$	0.533 *	$X_1 \cap X_8$	0.568 **	$X_2 \cap X_8$	0.503 *
$X_1 \cap X_8$	0.642 *	$X_1 \cap X_9$	0.504 *	$X_7 \cap X_8$	0.606 **	$X_1 \cap X_9$	0.571 *	$X_7 \cap X_8$	0.545 *
$X_9 \cap X_8$	0.716 *	$X_1 \cap X_8$	0.537 **	$X_1 \cap X_8$	0.621 *	$X_8 \cap X_9$	0.598 **	$X_1 \cap X_8$	0.603 *

注: * 代表双因子增强, ** 表示非线性增强。

4 讨论与结论

4.1 讨论

研究期间,关中地区整体耕地资源空间分布较为分散,但均匀程度有一定下降,各地区耕地专业化水平都较高,关中地区 CLF 综合指数下降了 6.1%,破碎化程度呈现下降趋势。但下降趋势主要集中于耕地破碎化程度不高的地区,这主要取决于现代农业的快速发展以及国家对高标准农田建设的大力支持与推广。基于地理探测器的影响因素分析表明,关中地区导致耕地破碎化的主要原因是海拔高度(X_1)、人口密度(X_6)、人均耕地面积(X_8)和地区总产值 GDP(X_9),而且海拔高度在各年份都保持着较高和稳定的因子贡献率,且与其余社会影响因子之间都具有较强的交互作用。

因此,虽然关中地区耕地破碎化以社会因素影响为主,但海拔高度对关中耕地破碎化的影响十分重要。而导致其余自然因素对耕地破碎化的影响小于社会因素的主要原因是关中地区存在较快的经济发展,吸引了大量的劳动力转移和人口增加,导致人地矛盾对 CLF 的影响的加深。

关中地区的耕地破碎化现象在 20 年的耕地管理发展和土地整治行为之后,仍旧呈现出了严重的空间差异,中东部地区的耕地细碎化程度本就不高却得到了进一步改善,而关中西部 and 北部地区耕地细碎化问题严重的地区并没有得到解决,这些地区本身自然条件就有一定的不足,应该作为重点整治区域,加强农业主题培育和农业社会化服务体系建设,还应该加强该地区耕地整治,避免无序开发耕地,优化地区农业政策优惠补贴,同时推进农业良种改革提高农户农田产量和收入,并保护山区退耕还林(草)政策实施效果,以进一步降低耕地细碎度。

耕地细碎化问题在全球分布广泛,虽然不同的国家对于土地的规划和管理制度和过程都存在较大的差异,但普遍存在由于土地所有权的碎片化而导致耕地细碎化问题^[42]。景观尺度上的研究无法触及由于所有权划分和土地利用分配系统引起的耕地细碎化^[43]。耕地细碎化是一个多因素共同作用而成的复杂问题,因此,耕地细碎化的解决除了要关注自然经济等数量指标,还要将各个地区所特有的政策规范^[44]、文化习俗^[42]、制度背景等^[43]相关指标加入到评价模型之中,以便更好地去识别和改善耕地细碎化现象。而这些指标必须结合微观权属细碎化研究,在收集农户意愿和基层政府的权属治理理念的情况下进行提取,建立框架,这样才能保证耕地细碎化现象

的改善工作顺利进行。

4.2 结论

(1) 2000—2020 年期间,关中地区 5 个年份的耕地洛伦兹曲线接近绝对平均线,且变化范围较小,表明研究地区耕地资源空间分布相对分散。耕地基尼系数分别为 0.289,0.303,0.289,0.288,0.349,整体上呈现波动上升的态势。关中地区 54 个县(区)中超过 57% 的县(区)区位熵大于 1,代表关中地区耕地专业化程度保持较高水平。

(2) 2000—2020 年期间,关中地区 CLF 的时空差异显著,CLF 程度整体下降,但部分地区 CLF 程度呈增减并存趋势。CLF 高值地区主要集中在关中西部 and 北部地区但并未得到明显改善,低值地区主要分布在关中中部 and 东部。CLF 综合指数随机集聚的县域分布格局总体稳定,高高区主要集中关中西部海拔较高且经济不发达地区;低低区集中在关中地区经济发达,人口旺盛的中东部区域的城市。低高地区分布较少。研究期间内未出现高低区,表明研究区内相邻县间 CLF 程度无显著差异,未观察到明显的极化现象。

(3) 2000—2020 年期间,关中地区 CLF 的时空分化受社会经济因素的综合影响明显强于自然因素。以海拔高度、人口密度、人均耕地面积和地区总产值 GDP 为主要影响因素,各种因素对关中地区 CLF 的影响并非相互独立。各因子间的相互作用效应强于单因子,以双因子增强为主,以非线性增强为主。

参考文献(References):

- [1] Lu H, Xie H, Lv T, et al. Determinants of cultivated land recuperation in ecologically damaged areas in China [J]. Land Use Policy, 2019,81:160-166.
- [2] Lu H, Xie H, Yao G. Impact of land fragmentation on marginal productivity of agricultural labor and non-agricultural labor supply: A case study of Jiangsu, China [J]. Habitat International, 2019,83:65-72.
- [3] Xu W Y, Jin X B, Liu J, et al. Analysis of influencing factors of cultivated land fragmentation based on hierarchical linear model: A case study of Jiangsu Province, China [J]. Land Use Policy, 2021,101:105119.
- [4] Sun X, Kong X, Wen L, et al. Farmland fragmentation and its managing models of the concentrated farmland in agricultural region of North China: A case study of Quzhou County in Hebei Province [J]. Res. Agric. Modernizat., 2019,40(4):556-564.
- [5] Sklenicka P. Classification of farmland ownership fragmentation as a cause of land degradation: A review on typology, consequences, and remedies [J]. Land Use Policy, 2016,57:694-701.

- [6] Sklenicka P, Zouhar J, Trpakova I, et al. Trends in land ownership fragmentation during the last 230 years in Czechia, and a projection of future developments[J]. *Land Use Policy*, 2017, 67: 640-651.
- [7] Han J, Zhang Y. Land policy and land engineering[J]. *Land Use Policy*, 2014, 40: 64-68. DOI: 10.1016/j. landusepol.2013.09.015.
- [8] 王嫚嫚, 刘颖, 蒯昊, 等. 土地细碎化, 耕地地力对粮食生产效率的影响: 基于江汉平原 354 个水稻种植户的研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1488-1496.
Wang M M, Liu Y, Kuai H, et al. The effects of land fragmentation and land quality on the technical efficiency of grain production based on 354 rice planters on the Jiangnan Plain[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1488-1496.
- [9] 王亚辉, 李秀彬, 辛良杰. 耕地地块细碎程度及其对山区农业生产成本的影响[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2658-2672.
Wang Y H, Li X L, Xin L J, et al. Characteristics of cropland fragmentation and its impact on agricultural production costs in mountainous areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2658-2672.
- [10] 许玉光, 杨钢桥, 文高辉. 耕地细碎化对耕地利用效率的影响: 基于不同经营规模农户的实证分析[J]. *农业现代化研究*, 2017, 38(4): 688-695.
Xu Y G, Yang G Q, Wen G H, et al. Impacts of arable land fragmentation on land use efficiency: An empirical analysis based on farms of different scales[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, 38(4): 688-695.
- [11] Wei L, Luo Y, Wang M, et al. Essential fragmentation metrics for agricultural policies: Linking landscape pattern, ecosystem service and land use management in urbanizing China[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 182: 102833.
- [12] 李建林, 陈瑜琦, 江清霞, 等. 中国耕地破碎化的原因及其对策研究[J]. *农业经济*, 2006(6): 21-23.
Li J L, Chen Y Q, Jiang Q X, et al. Research on the causes and countermeasures of cultivated land fragmentation in China[J]. *Agricultural Economy*, 2006(6): 21-23.
- [13] 李庆东, 王秋兵, 钱凤魁, 等. 农户耕地经营细碎化分析: 以辽宁省昌图县为例[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(6): 230-232.
Li Q D, Wang Q B, Qian F K, et al. Analysis on fragmentation of cultivated land in typical region: A case of Changtu county in Liaoning province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(6): 230-232.
- [14] Jiang Y, Hou L, Shi T, et al. Spatial zoning strategy of urbanization based on urban climate co-movement: A case study in Shanghai mainland area[J]. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2706.
- [15] Surya B, Salim A, Hernita H, et al. Land use change, urban agglomeration, and urban sprawl: A sustainable development perspective of Makassar City, Indonesia[J]. *Land*, 2021, 10(6): 556.
- [16] Wang J, Yu C A O, Fang X, et al. Does land tenure fragmentation aggravate farmland abandonment? Evidence from big survey data in rural China[J]. *Journal of Rural Studies*, 2022, 91: 126-135.
- [17] Looga J, Jurgenson E, Sikk K, et al. Land fragmentation and other determinants of agricultural farm productivity: The case of Estonia[J]. *Land Use Policy*, 2018, 79: 285-292.
- [18] Yucer A A, Kan M, Demirtas M, et al. The importance of creating new inheritance policies and laws that reduce agricultural land fragmentation and its negative impacts in Turkey[J]. *Land Use Policy*, 2016, 56: 1-7.
- [19] Liu J, Jin X B, Xu W Y, et al. Evaluation of cultivated land fragmentation and guidance of land consolidation at provincial level[J]. *Sci. Geogr. Sin.*, 2019, 39: 817-826.
- [20] Xie H, Lu H. Impact of land fragmentation and non-agricultural labor supply on circulation of agricultural land management rights[J]. *Land Use Policy*, 2017, 68: 355-364.
- [21] 黄思琴, 陈英, 张仁陟, 等. 基于景观指数的耕地细碎化与农业经济水平的空间相关性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3): 238-244.
Huang S Q, Chen Y, Zhang R S, et al. Spatial correlation analysis of land fragmentation and agriculture development based on landscape indexes[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3): 238-244.
- [22] 张海鑫, 杨钢桥. 耕地细碎化及其对粮食生产技术效率的影响: 基于超越对数随机前沿生产函数与农户微观数据[J]. *资源科学*, 2012, 34(5): 903-910.
Zhang H X, Yang G Q. The effects of land fragmentation on technical efficiency of food production: An empirical analysis based on stochastic frontier production function and micro-data of households[J]. *Resources Science*, 2012, 34(5): 903-910.
- [23] Baker W L, Cai Y. The r. le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system[J]. *Landscape Ecology*, 1992, 7(4): 291-302.
- [24] Zhang X, Cai Z, Li G, et al. Assessment of determinants of cultivated land fragmentation and its impacts on rural income[J]. *Sci. Surv. Mapp*, 2020, 45: 134-141.
- [25] Zhou Z. Impact of the agricultural landscape change on ecosystem services in the process of rapid urbanization region: A case study of Xi'an metropolitan zone[J]. *Arid. Land. Geogr*, 2015, 38: 1004-1013.

- [26] Gong Z, Zhang Y, Gong H L, et al. Evolution of wet-land landscape pattern and its driving factors in Beijing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 77-88.
- [27] 臧亮, 梁红颖, 梁文涛, 等. 基于景观格局的卢龙县耕地细碎化评价及影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 265-269.
- Zang L, Liang H Y, Liang W T, et al. Cultivated Land Fragmentation and Affect Factors of Lulong County based on landscape pattern[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 265-269.
- [28] Chen W, Chi G, Li J. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995—2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470.
- [29] Tang J, Wang X. Analysis of the land use structure changes based on Lorenz curves [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 151(1): 175-180.
- [30] Zheng X, Xia T, Yang X, et al. The land Gini coefficient and its application for land use structure analysis in China[J]. *Plos One*, 2013, 8(10): e76165.
- [31] 陈红宇, 朱道林, 郎文聚, 等. 嘉兴市耕地细碎化和空间集聚格局分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 235-242.
- Chen H Y, Zhu D L, Yun W J, et al. Analysis on cultivated land fragmentation and spatial agglomeration pattern in Jiaxing city[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(4): 235-242.
- [32] 李鑫, 欧名豪, 马贤磊. 基于景观指数的细碎化对耕地利用效率影响研究: 以扬州市里下河区域为例[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1758-1767.
- Li X, Ou M H, Ma X L. Analysis on impact of fragmentation based on landscape index to cultivated land use efficiency: A case on lixiahe district in Yangzhou City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(10): 1758-1767.
- [33] 李鑫, 欧名豪, 肖长江, 等. 基于景观指数的细碎化对耕地生产效率影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(6): 707-713.
- Li X, Ou M H, Xiao C J, et al. Study on impacts of landscape fragmentation to cultivated land production efficiency[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(6): 707-713.
- [34] 王道骏, 陈英, 贾首杰, 等. 基于景观格局指数的耕地细碎化研究: 以甘肃省临夏北塬地区为例[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(32): 184-188.
- Wang D J, Chen Y, Jia S J, et al. The research of land fragmentation based on landscape pattern index: Taking beiyuan district in Linxia of Gansu province as an example [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(32): 184-188.
- [35] Toebe M, Cargnelutti Filho A. Multicollinearity in path analysis of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 453-462.
- [36] Anselin L. Lagrange multiplier test diagnostics for spatial dependence and spatial heterogeneity[J]. *Geographical Analysis*, 1988, 20(1): 1-17.
- [37] Niroula G S, Thapa G B. Impacts and causes of land fragmentation, and lessons learned from land consolidation in South Asia[J]. *Land Use Policy*, 2005, 22(4): 358-372.
- [38] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [39] 纪月清, 王许沁, 陆五一, 等. 农业劳动力特征、土地细碎化与农机社会化服务[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(5): 910-916.
- Ji Y Q, Wang X Q, Lu W Y, et al. The characteristics of rural labors, land fragmentation, and agricultural machinery services [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(5): 910-916.
- [40] 张丽, 何晓旭, 魏鸣. 基于 NDVI 的淮河流域植被覆盖度动态变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(S1): 51-56.
- Zhang L, He X X, Wei M. Dynamic change of vegetation coverage in Huaihe River Basin based on NDVI [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(S1): 51-56.
- [41] 葛美玲, 封志明. 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(2): 202-210.
- Ge M L, Feng Z M. Population distribution of China based on GIS: Classification of population densities and curve of population gravity centers[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(2): 202-210.
- [42] Carsjens G J, Van Lier H N. Fragmentation and land-use planning—an introduction [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58(2,4): 79-82.
- [43] Ntihinyurwa P D, De Vries W T, Chigbu U E, et al. The positive impacts of farm land fragmentation in Rwanda[J]. *Land Use Policy*, 2019, 81: 565-581.
- [44] Hartvigsen M. Land reform and land fragmentation in Central and Eastern Europe [J]. *Land Use Policy*, 2014, 36: 330-341.