



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

黄河流域下游煤矿采煤塌陷区耕地破碎化动态演变 ——以山东济宁市为例

郭家新¹, 胡振琪^{1,2}, 袁冬竹¹, 梁宇生¹, 李鹏宇¹, 杨坤¹, 浮耀坤¹

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:黄河流域下游煤矿区多属于高潜水位矿区, 煤炭开采引发地表塌陷, 积水严重。同时存在耕地面积持续消退、生态失衡等问题, 严重影响资源可持续利用和社会经济发展。在我国提出生态文明建设和粮食安全保障的重点时期, 亟需揭示矿区耕地资源的动态演变规律和解决采煤塌陷区土地资源利用与保护问题。通过以黄河流域下游“煤-粮”复合区山东济宁市为研究对象, 基于概率积分法预测2019—2030年采煤塌陷地扩张以及土地资源损毁情况, 结合形态学空间格局分析(MSPA)选取1 pixel和2 pixel宽度阈值, 通过斑块重要度指数(I_{dpc})分别提取不同阈值下研究区内集中连片且面积较大的耕地重要核心区, 采用整体连通性指数(I_{lcc})定量分析2018—2030年耕地核心区因塌陷损毁导致的耕地破碎化动态演变过程。结果表明: ①济宁市2018—2030年间采煤塌陷区不断扩张, 到2030年预测采煤塌陷区50 613.52 hm², 损毁土地中耕地面积32 603.65 hm², 且东滩煤矿损毁耕地最为严重; ②MSPA分析中边缘宽度阈值设定将会导致斑块数量以及内部连接度显著变化, 在1 pixel阈值下表征塌陷导致的细小耕地破碎化作用明显; ③未来10 a济宁市采煤塌陷造成耕地面积持续减少, 耕地重要核心区域逐渐消退, 煤矿区内耕地呈现破碎零散的分布状态, 且小尺度的煤矿区耕地面积变化, 导致周围大片耕地连接度降低; ④不同资源赋存、生产利用状况不同, 导致不同煤矿耕地破碎化特征明显差异。其中岱庄生建煤矿、北徐楼煤矿耕地平均 I_{lcc} 值变化较大, 分别下降0.65和0.64; 高庄煤矿、横河煤矿、济宁二号煤矿、三河口煤矿和杨庄煤矿平均 I_{lcc} 值分别下降0.58, 0.55, 0.55, 0.51, 0.51, 表明未来10 a矿区内的耕地连接度大幅下降、破碎化程度加剧。综上所述, 塌陷区耕地的减少在一定程度上降低了市域范围耕地连接度, 因此在今后土地复垦工作中, 各煤矿区需要强化耕地复垦的力度, 从而减小对农业生产的负面影响。

关键词:黄河流域; 采煤塌陷区; 耕地破碎化; 形态学; 空间格局分析; 济宁市

中图分类号: TD88

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)09-3039-17

Dynamic evolution of cultivated land fragmentation in coal mining subsidence area of the Lower Yellow River Basin: A case study of Jining city, Shandong Province

GUO Jiaxin¹, HU Zhenqi^{1,2}, YUAN Dongzhu¹, LIANG Yusheng¹, LI Pengyu¹, YANG Kun¹, FU Yaokun¹

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Environment Science and Spatial Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

收稿日期: 2020-05-20 修回日期: 2020-08-27 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0872

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771542); 中国工程院学部咨询课题资助项目(2018-XY-19)

作者简介: 郭家新(1992—), 男, 河南温县人, 博士研究生。E-mail: guojx199211@163.com

通讯作者: 胡振琪(1963—), 男, 安徽五河人, 教授, 博士。E-mail: huzq1963@163.com

引用格式: 郭家新, 胡振琪, 袁冬竹, 等. 黄河流域下游煤矿采煤塌陷区耕地破碎化动态演变——以山东济宁市为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 3039-3055.

GUO Jiaxin, HU Zhenqi, YUAN Dongzhu, et al. Dynamic evolution of cultivated land fragmentation in coal mining subsidence area of the Lower Yellow River Basin: A case study of Jining city, Shandong Province[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 3039-3055.



移动阅读

Abstract: The coal mining areas in the Lower Yellow River Basin are mostly high water table mining areas. Coal mining leads to surface subsidence and serious water accumulation. At the same time, there are problems such as the continuous decline of a cultivated land area and ecological imbalance, which seriously affect the sustainable utilization of resources, and social and economic construction. In the key period of ecological protection and food security, it is urgent to reveal the dynamic change law of cultivated land resources and solve the problem of land resources utilization and protection in coal mining subsidence areas. In this study, Jining mining area in the “coal grain” composite area in the Lower Yellow River Basin is taken as the research object. Based on the probability integral method, the subsidence land expansion and land resource damage in Jining mining area from 2019 to 2030 are predicted. Combined with the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA), 1 pixel and 2 pixel width thresholds were selected, the patch importance index (I_{IPC}) was used to extract the large and concentrated core areas of cultivated land in the study area under different thresholds. Finally, the dynamic evolutionary process of cultivated land fragmentation caused by collapse damage in the core area of cultivated land from 2018 to 2030 was quantitatively analyzed by the integral index of connectivity (I_{IC}). The results show that: ① the coal mining subsidence area in Jining City will continue to expand from 2018 to 2030. By 2030, the coal mining subsidence area is predicted to be 50 613.52 hm^2 , and the cultivated land area of a damaged land is 32 603.65 hm^2 , and Dongtan coal mine is the most seriously damaged cultivated land. ② In MSPA analysis, the threshold setting of edge width will lead to significant changes in the number of patches and internal connectivity, and the fragmentation of small cultivated land caused by collapse is obvious at 1 pixel threshold. ③ In the next 10 years, the coal mining sub-sidence in Jining city will cause the continuous decrease of cultivated land area, and the important core area of cultivated land will gradually fade away. The cultivated land in the mining area will be fragmented and scattered, and the small-scale change of cultivated land area in the coal mining area will lead to the decrease of cultivated land connectivity in large areas around. ④ Different coal mining areas have different resource occurrence, production and utilization status, which leads to obvious differences in the fragmentation characteristics of cultivated land in different coal mines. The average I_{IC} value of cultivated land in Daizhuang Shengjian coal mine and Beixulou coal mine decreases by 0.65 and 0.64 respectively. The average I_{IC} value of Gaozhuang coal mine, Henghe coal mine, Jining No. 2 coal mine, Sanhekou coal mine and Yangzhuang coal mine decreases by 0.58, 0.55, 0.55, 0.51 and 0.51 respectively, which indicate that the cultivated land connectivity in the mining area decreases significantly and the degree of fragmentation increases in the next 10 years. In general, the reduction of cultivated land in the subsidence areas has reduced the connectivity of cultivated land in the city to a certain extent. Therefore, in the future land reclamation work, the coal mining areas need to strengthen the intensity of cultivated land reclamation to reduce the negative impact on agricultural production.

Key words: Yellow River Basin; coal mining subsidence area; cultivated land fragmentation; morphology; spatial pattern analysis; Jining city

我国黄河流域下游煤矿区多为井工开采方式,因长期煤炭开采,上覆岩层发生移动和变形,受煤层采深和厚度的影响,采深越大煤层越厚,地表塌陷就越严重^[1-2]。当岩层移动发展到地表以后,形成地表移动盆地,当地表下沉到潜水位以下时,引起地表常年积水,无法耕种。在移动盆地的外边缘区,表土受到拉伸变形,往往出现裂缝,破坏了土地的连续性以及地下含水层的结构,使地下水位下降,出现地表干旱现象,裂缝严重的区域还会造成房屋坍塌和倾斜^[3]。在低潜水位地区,由于地表倾斜和拉伸变形引发土壤侵蚀,改变土壤持水和通气能力,影响有机物和矿物质的分解,破坏了微生物适宜的生活环境。而在高潜

水位地区,地表塌陷引起地下潜水位相对上升,产生常年积水或季节性积水,造成水蒸发量增加,加速农田土壤盐渍化,而且大面积农田绝产,给当地农业生产造成巨大损失^[4-5]。因此“要煤还是要粮”成为“煤-粮”复合区煤炭开采面临的首要问题^[6-7]。随着我国政府对生态环境保护工作的重视和加强,采煤塌陷地治理成为当前生态环境领域研究的热点之一。济宁市矿区是我国黄河流域下游典型的高潜水位“煤-粮”复合区,地表下沉 1.5 m 左右塌陷区域内便可积水(其中南四湖附近下沉 0.2~0.3 m 即可积水),矿产资源开采所带来的负面生态效应逐渐显露,造成矿区耕地大量损毁,耕地结构受到前所未有的

变化^[8-9]。

耕地破碎化现象是指经过自然或人为因素干扰,耕地由单一均质和集中连片的整体向复杂、零散分布演变的动态过程^[10]。耕地破碎化对农业生产的影响主要体现在2个方面,一方面耕地破碎化导致耕地利用率和农业机械化程度降低,在一定程度上造成了土地资源浪费及农业生产成本增加;另一方面,不利于农业的规模化经营,降低农民生产的积极性,阻碍现代农业的发展。但是我国作为人多地少的发展中国家,耕地破碎化现象长期存在,因此如何优化耕地空间格局,提高耕地利用率已成为亟待解决的问题之一。目前,国内外学者已经基于不同角度,不同方法对耕地破碎化进行了广泛的研究。国外学者的研究起步较早,多涵盖耕地破碎化的概念界定^[11]、成因对策^[12]、空间分布^[13]以及农业生产^[14]的内在关系等方面。而国内学者更多的侧重于耕地破碎化的内涵^[15]、影响^[16]和评价^[17]等,研究尺度多集中于县域、乡镇等中小尺度,且多以定性分析和综合评价方法为主。但是基于景观空间格局角度分析采煤塌陷所导致的耕地破碎效应研究较少。笔者引入景观连接度来丰富耕地破碎化的含义,其表现为景观要素在空间分布上连接程

度^[18-20]。针对济宁市近年来因采煤塌陷引起的地面扰动,致使土地资源特别是耕地资源的空间格局变化为出发点,定量分析了济宁市2019—2030年采煤塌陷土地受损状况及耕地破碎化演变过程,为今后资源型城市建设、矿区土地复垦、耕地开发利用管理、基本农田划定及相关政策制定提供借鉴。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

济宁市位于山东省西南部(图1),地处黄淮海平原与鲁中南山地交接地带,介于北纬 $34.43^{\circ} \sim 35.95^{\circ}$,东经 $115.87^{\circ} \sim 117.60^{\circ}$,属暖温带季风气候,年平均降水量 $597 \sim 820 \text{ mm}$ 。地形以平原洼地为主,地势东高西低,南北长 167 km ,东西宽 158 km ,总面积 $1.11 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。2018年底,济宁市耕地面积 $701\,430.33 \text{ hm}^2$,林地 $18\,201.06 \text{ hm}^2$,草地 $51\,555.78 \text{ hm}^2$,水域 $135\,339.62 \text{ hm}^2$,建设用地 $194\,364.39 \text{ hm}^2$,未利用地 $8\,434.53 \text{ hm}^2$ 。济宁矿产资源丰富,且以煤炭资源为主,主要有兖州矿区、济宁矿区等,含煤面积 $4.83 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。经勘探预测储量260亿t,占山东省的50%,主要分布于兖州市、邹城市、微山县等地。

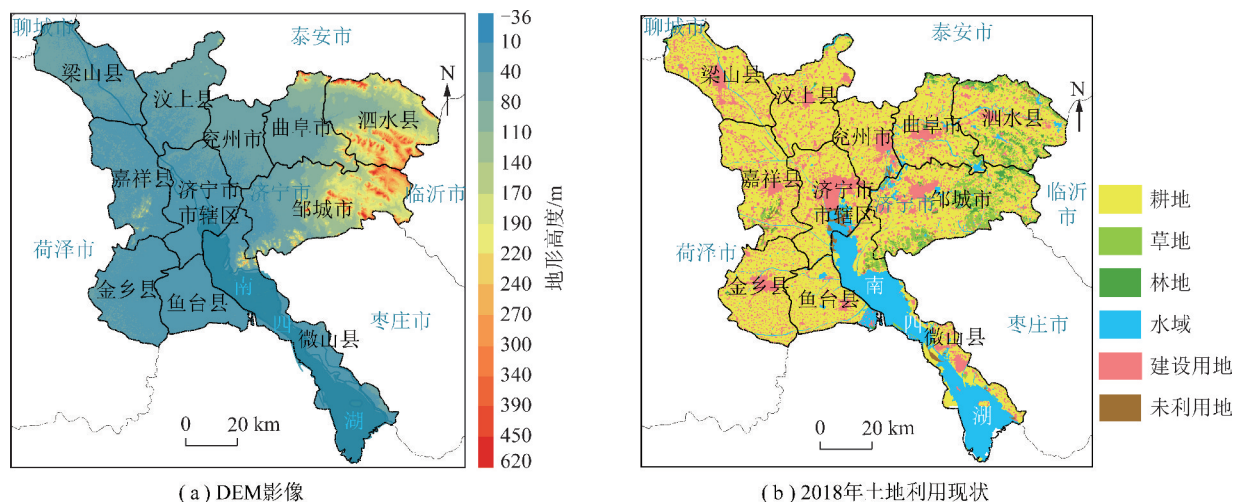


图1 研究区 DEM 影像及 2018 年土地利用现状

Fig. 1 DEM image of the study area and land use status map in 2018

1.2 数据来源与处理

本研究主要采用 Landsat8 OLI 卫星数字产品解译的2018年7月济宁市多时相土地利用/覆盖遥感监测数据(数据来源:中国科学院资源环境科学数据中心)。基于ENVI监督分类以及CNLUCC数据分类体系进行地类提取,其中1级分类包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地等;2级分类包括旱地、水田、灌木林、草地覆盖度、城镇用地、农村居民点等。

根据前期采集的各类重要斑块要素实测点以及高精度航拍数据对解译数据进行精度验证:耕地、城市及农村居民点精度不低于95%;草地、林地、水域精度不低于90%;未利用地精度不低于85%。并根据研究需要进行30 m和100 m分辨率的数据转换。另外,2019年采煤塌陷地现状数据由各矿业集团实测提供,最后通过矿区沉陷预计(MSPS 2007),ArcGIS 10.4, ArcGIS-Conefor,景观分析(Guidos Toolbox 2.9)

软件完成基本图件的分析与制作。

1.3 研究方法

1.3.1 基于概率积分法的煤矿采煤沉陷预测分析

常用的沉陷预计方法有概率积分法。概率积分法是把岩体看作一种随机介质,岩层看作是由大量松散的颗粒体介质组成,由此来研究岩层与地表移动。按随机介质理论,单元开采引起的地表单元下沉盆地呈正态分布,且与概率密度的分布一致^[21-22]。因此,整个开采引起的下沉剖面方程可以表示为概率密度函数的积分公式。地表单元下沉盆地的表达式为

$$W_e(x) = \frac{1}{r^2} \exp\left(-\pi \frac{x^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

其中, $W_e(x)$ 为单元点下沉值; r 为主要影响半径,主要与单元采深和主要影响角有关; x 为地表任意一点的横坐标值。通过上述表达式可以看出,在单元开采时,地表产生的下沉盆地,其函数形式与正态分布概率密度函数相同。

煤炭开采后上覆岩层移动不会立即波及地表,这一过程是渐进且相对缓慢的,当采煤工作完成一段时间后,地表移动经过开始阶段、活跃阶段、衰退阶段,最终形成稳定的状态。本研究在确定塌陷地稳沉情况时,综合考虑地表移动持续时间和后续开采影响范围,将已稳定且不再受后续开采影响的塌陷区划定为已稳沉采煤塌陷区(表 1)。

表 1 按终采时间确定的顶板垮落采空区场地稳定性等级

Table 1 Stability grade of goaf with sufficient roof caving determined by final mining time

稳定等级	终采时间 t/a		
	软质覆岩	硬质覆岩	坚硬覆岩
稳定	$1.0 < t$	$2.5 < t$	$4.0 < t$
基本稳定	$0.6 < t \leq 1.0$	$1.5 < t \leq 2.5$	$2.5 < t \leq 4.0$
不稳定	$t \leq 0.6$	$t \leq 1.5$	$t \leq 2.5$

矿区采煤塌陷地损毁程度反映了土地质量变化程度。依据采煤塌陷预计与地下潜水位的关系,将采煤塌陷程度划分为轻度塌陷(无积水,地表下沉值要小于丰水季的地下水埋深)、中度塌陷(季节性积水)和重度塌陷(常年积水,地表下沉值要大于枯水季的地下水埋深)3 种类型。由于济宁市矿井分布较多,各区域地表潜水位不同,导致地面积水情况差异较大,因此将济宁市共划分了 3 个不同的标准(表 2)。

根据济宁市各煤矿提供的采掘计划、矿产资源规划以及开采预测参数(角点坐标、煤层走向、煤层开采厚度、采深及煤层倾角、下沉系数、主要影响角正切、水平移动系数和影响传播角),基于概率积分法

利用 MSPS 软件预测 2025、2030 年各阶段的采煤塌陷情况。

表 2 济宁市采煤塌陷损毁程度界定

Table 2 Definition of mining subsidence damage degree in Jinning City

标准	地表下陷值/m		
	轻度塌陷	中度塌陷	重度塌陷
标准 1	0.3~1.0	1.0~3.0	>3.0
标准 2	0.3~1.5	1.5~3.5	>3.5
标准 3	0.1~0.8	0.8~3.5	>3.5

1.3.2 基于形态学空间格局(MSPA)的景观分析

MSPA 分析方法基于图形学原理,运用开闭运算等数学方法对栅格图像进行识别、分割,并解译研究区景观要素,从而得出像元层面的精确景观结构。根据 2018 年济宁市土地利用/覆盖遥感监测数据,提取耕地作为 MSPA 分析的前景数据(赋值为 2),林地、草地、水域、建设用地、其他未利用地作为背景数据(赋值为 1)。基于 Guidos Toolbox 分析软件,得到互不相交的 7 种景观要素和背景要素,分别为核心区、岛状斑块、孔隙、边缘区、环道区、桥接区、支线和背景(图 2)。(景观类型及颜色符号详情参见 Guidos Toolbox 手册)。

在 MSPA 分析中,边缘宽度(Edge Width)阈值的设定会对整个研究区景观要素面积和内部结构产生较大影响^[23]。边缘宽度的增加使核心区转换成桥接、边缘和环道(图 3)。研究中考虑到不同阶段塌陷损毁耕地面积的差异,选取 1 pixel 和 2 pixel 边缘宽度对耕地斑块进行对比计算,分别对应 30 m 和 100 m 分辨率。

利用 Guidos Toolbox 2.9 以及 ArcGIS-Conefor 插件,选用斑块重要指数(I_{dpc})和整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, I_{IIC})对研究区耕地斑块进行定量化研究。在此方法中,需要设定斑块连通距离阈值,当斑块间的距离大于阈值,斑块间无法进行连通性运算;当斑块间的距离小于或等于阈值,则可以进行连通运算^[24]。基于文献分析^[25-26]以及多组阈值测算和筛选,最终确定市域尺度下的斑块连通距离阈值设定为 1 500 m,连通的概率设定为 0.5;同时考虑到煤矿耕地分布范围较小,将煤矿尺度下的连通距离阈值设置为 100 m,连通的概率设为 0.5 进行耕地连接度评价。

可能连接度指数(Probability of Connectivity, I_{PC}):

$$I_{PC} = \frac{1}{A_L^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j P_{ij}^* \quad (2)$$

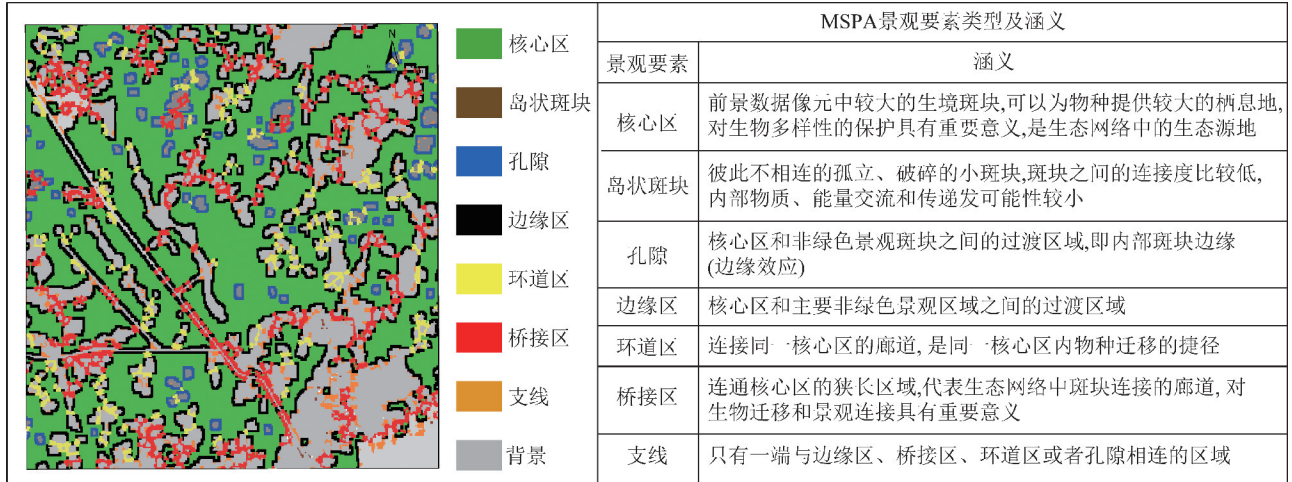


图2 MSPA 景观要素类型及涵义示意

Fig. 2 MSPA landscape elements type and meaning

其中, n 为斑块总数; a_i, a_j 为斑块 i, j 的面积; A_L 为景观总面积; P_{ij}^* 为斑块 i, j 间扩散的最大概率。 I_{PC} 的值在 0~1, 值越大表明斑块之间连通的可能性越大。

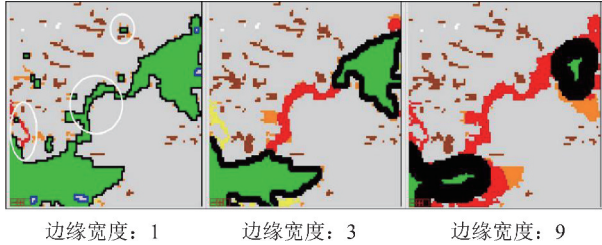


图3 不同边缘宽度下的 MSPA 类型变化

Fig. 3 MSPA type changes under different edge widths

斑块重要指数 (I_{dpc}):

$$I_{dpc} = \frac{I_{PC} - I_{PC, \text{remove}}}{I_{PC}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, I_{dpc} 为基于可能连接度指数 (I_{PC}) 计算结果, 用于反映所去除某要素的重要程度, 可评价要素对整体景观连通性的重要程度, 其值越大说明要素重要性越高; $I_{PC, \text{remove}}$ 为在景观中斑块 i 去除后的计算结果。笔者将耕地斑块整体连通性按照自然断点法进行分级, 将耕地核心区重要度分为 5 级: 1 级 ($0.5 < I_{dpc}$), 2 级 ($0.3 < I_{dpc} \leq 0.5$), 3 级 ($0.1 < I_{dpc} \leq 0.3$), 4 级 ($0.01 < I_{dpc} \leq 0.1$), 5 级 ($I_{dpc} \leq 0.01$)。

整体连通性指数 (Integral Index of Connectivity, I_{IIC}):

$$I_{IIC} = \frac{1}{A_L^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + n l_{ij}} \quad (4)$$

其中, I_{IIC} 为整体连通性指数, 用来表征耕地破碎化程度; l_{ij} 为 i 到 j 的最短路径。 $0 \leq I_{IIC} \leq 1$, $I_{IIC} = 0$ 时, 为各生境斑块之间没有连接; $I_{IIC} = 1$ 时, 为整个景观都为生境斑块。 I_{IIC} 值越高, 耕地破碎程度越低, 反之越

小。与 I_{dpc} 值分级不同, 根据结果权重将耕地核心区整体连通性分为 6 级: 1 级 ($0.45 < I_{IIC}$), 2 级 ($0.30 < I_{IIC} \leq 0.45$), 3 级 ($0.15 < I_{IIC} \leq 0.30$), 4 级 ($0.07 < I_{IIC} \leq 0.15$), 5 级 ($0.01 < I_{IIC} \leq 0.07$), 6 级 ($I_{IIC} \leq 0.01$)。

2 结果与分析

2.1 济宁市 2019—2030 年采煤塌陷预测及土地损毁分析

根据各矿业集团提供的 2019 年采煤塌陷地现状数据, 结合采掘计划和矿产资源规划进行 2025、2030 年采煤塌陷预测 (图 4)。预测期内塌陷地仍然集中在济宁市辖区、兖州市、邹城市、微山县内, 呈现由点向面扩散的趋势, 其他县市塌陷地较分散, 规模较小。2019 年济宁市采煤塌陷现状面积 41 100.11 hm^2 , 其中已稳沉 29 941.56 hm^2 。预测至 2025 年, 济宁市将形成采煤塌陷地 47 327.50 hm^2 , 较 2019 年新增 6 227.39 hm^2 , 年均增加 1 037.90 hm^2 ; 预测至 2030 年, 济宁市塌陷面积 50 613.52 hm^2 , 较 2019 年新增 9 513.41 hm^2 , 年均增加 864.86 hm^2 。整体来看, 2019—2030 年济宁市塌陷区面积持续增加, 但从 2025 年以后, 塌陷面积的增加幅度逐渐下降 (表 3)。

根据 2018 年济宁市土地利用现状数据, 2019 年采煤塌陷已损毁耕地 25 317.45 hm^2 , 占损毁总面积的 62.00%; 损毁建设用地 5 571.68 hm^2 , 占损毁总面积的 13.56% (表 4)。采煤塌陷给矿区人民生产、生活带来极大的影响, 耕地大量减少, 水域面积不断增加, 甚至地表裂缝加剧, 房屋倒塌。对区域工农业生产、生态环境以及社会安定产生了严重危害, 制约了区域经济的可持续发展。根据土地损毁情况分析,

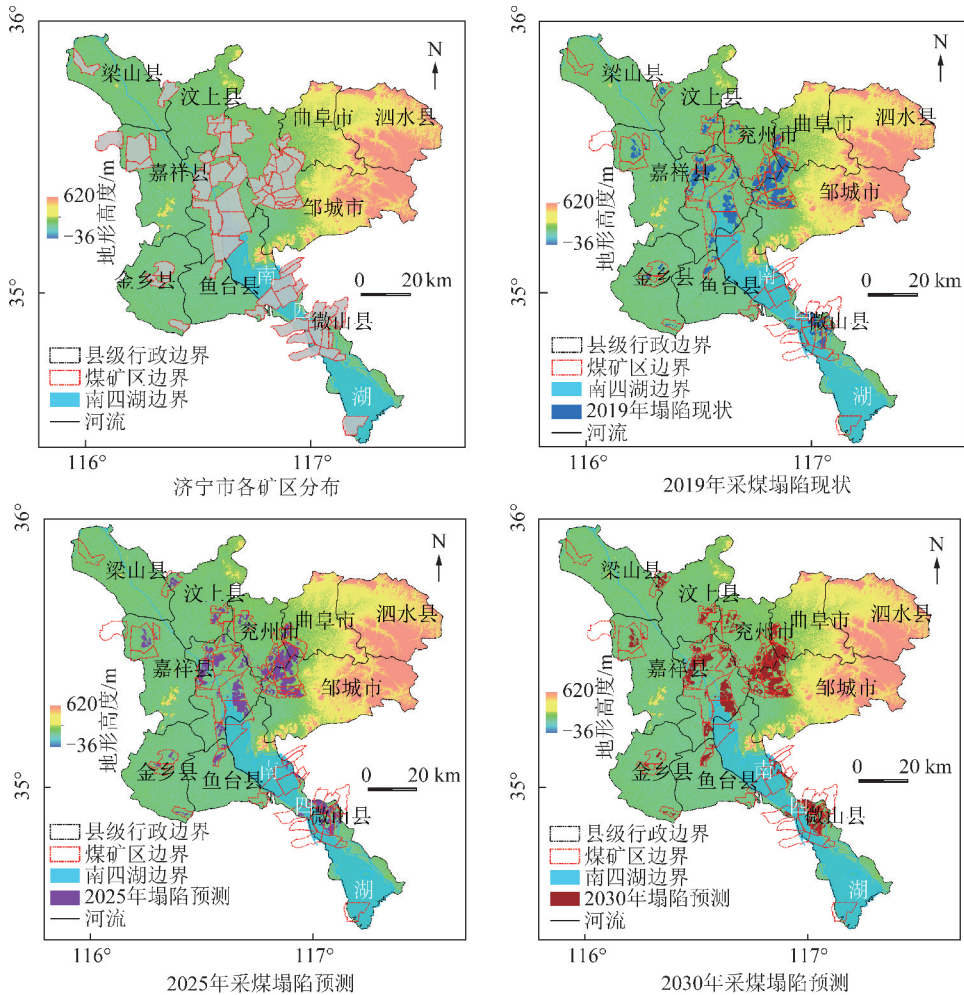


图 4 2019—2030 年采煤塌陷区分布

Fig. 4 Distribution of coal mining subsidence area in 2019—2030

表 3 济宁市 2019—2030 年采煤塌陷损毁预测

Table 3 Prediction of mining subsidence damage in Jining City from 2019 to 2030

项目	塌陷总面积/ hm ²	轻度塌陷		中度塌陷		重度塌陷		已稳沉面积/ hm ²
		面积/ hm ²	占总面积 比例/%	面积/ hm ²	占总面积 比例/%	面积/ hm ²	占总面积 比例/%	
2019 年塌陷现状	41 100.11	30 656.10	74.59	3 556.61	8.65	6 887.40	16.76	29 941.56
2025 年塌陷预测	47 327.50	36 116.00	76.31	4 483.50	9.47	6 728.01	14.22	37 910.70
2030 年塌陷预测	50 613.52	39 397.10	77.84	4 467.45	8.83	6 748.98	13.33	48 179.78

塌陷区内绝大多数为耕地,而且损毁区域村庄稠密,今后耕地保护和村庄搬迁将是济宁市未来 10 a 间主要面临的两大问题。

2.2 基于 MSPA 的耕地核心区识别及重要度、连接度分析

根据 MSPA 分析济宁市耕地核心区分布(图 5, 6)以及不同边缘宽度耕地 MSPA 类型计算结果(表 5),阈值的大小不会造成斑块总面积的变化,但会改变斑块的内部结构,且不同的分辨率及边缘阈值的设定使得耕地核心区面积变化明显。2018 年,1 pixel

阈值下的耕地核心区面积为 639 504.29 hm²,而 2 pixel 阈值下的耕地核心区面积为 346 906.02 hm²,边缘宽度的增加造成核心区面积急剧下降,更多的非核心区被识别,较大面积的耕地破碎为小面积的斑块,从而转化为边缘区、桥接区和环道区。此外,研究发现 2019—2030 年采煤塌陷对济宁市耕地核心区大面积斑块影响较小,对小面积斑块影响较大,尤其是 2018 年和 2019 年塌陷严重的市辖区中部、兖州东南部、邹城西北部等,受到采矿强烈影响且持续的耕地破坏,斑块呈辐射状且大面积的消退。

表 4 济宁市 2019—2030 年采煤塌陷损毁土地类型面积统计

Table 4 Statistics of land types damaged by coal mining subsidence in Jining City from 2019 to 2030

2018 年土地利用类型		2019 年塌陷现状		2025 年塌陷预测		2030 年塌陷预测	
		损毁面 积/hm ²	损毁总 计/hm ²	损毁面 积/hm ²	损毁总 计/hm ²	损毁面 积/hm ²	损毁总 计/hm ²
耕地	旱地	23 565. 41	25 317. 45	27 474. 09	30 045. 80	29 672. 06	32 603. 65
	水田	1 752. 03		2 571. 71		2 931. 58	
林地	灌木林	6. 19	6. 19	14. 31	14. 31	14. 92	14. 92
草地	低覆盖度草地	2. 58	646. 20	2. 58	663. 13	2. 58	697. 16
	高覆盖度草地	565. 08		578. 26		610. 39	
	中覆盖度草地	78. 55		82. 29		84. 20	
建设用地	城镇用地	753. 99	5 571. 68	1 055. 23	6 871. 88	1 260. 10	7 542. 25
	农村居民点	4 362. 42		5 346. 97		5 804. 73	
	其他建设用地	455. 27		469. 68		477. 42	
未利用土地	沙地	43. 86	1 107. 23	43. 86	1 281. 02	43. 86	1 304. 18
	沼泽地	1 063. 37		1 237. 16		1 260. 32	
水域 (2018 年塌陷水域)		—	8 451. 36	—	8 451. 36	—	8 451. 36
损毁总面积		41 100. 11		47 327. 50		50 613. 52	

注:2018 年济宁市土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;济宁市采煤塌陷基础数据来源于山东省能源局。

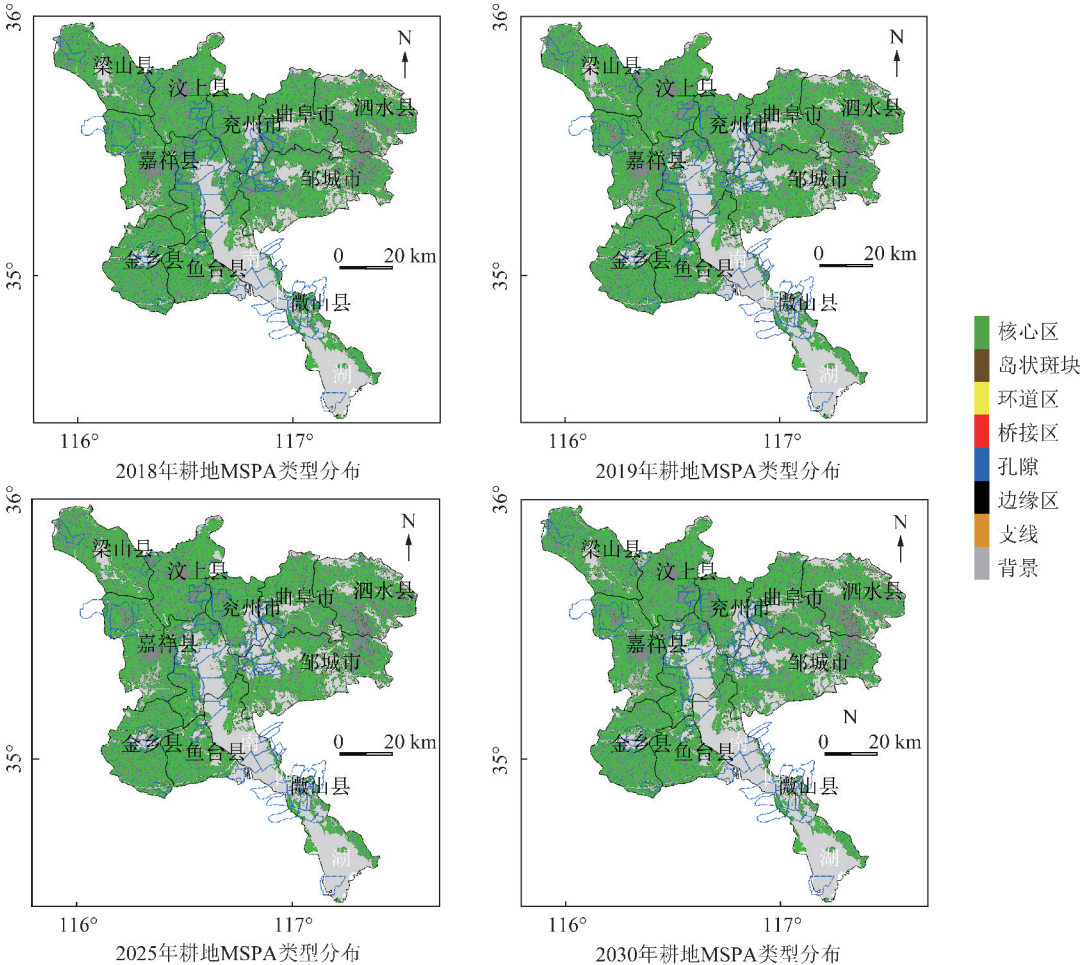


图 5 2018—2030 年边缘宽度 30 m 的耕地核心区 MSPA 类型分布

Fig. 5 Distribution of MSPA types in the core area of cultivated land with different edge widths in 2018—2030

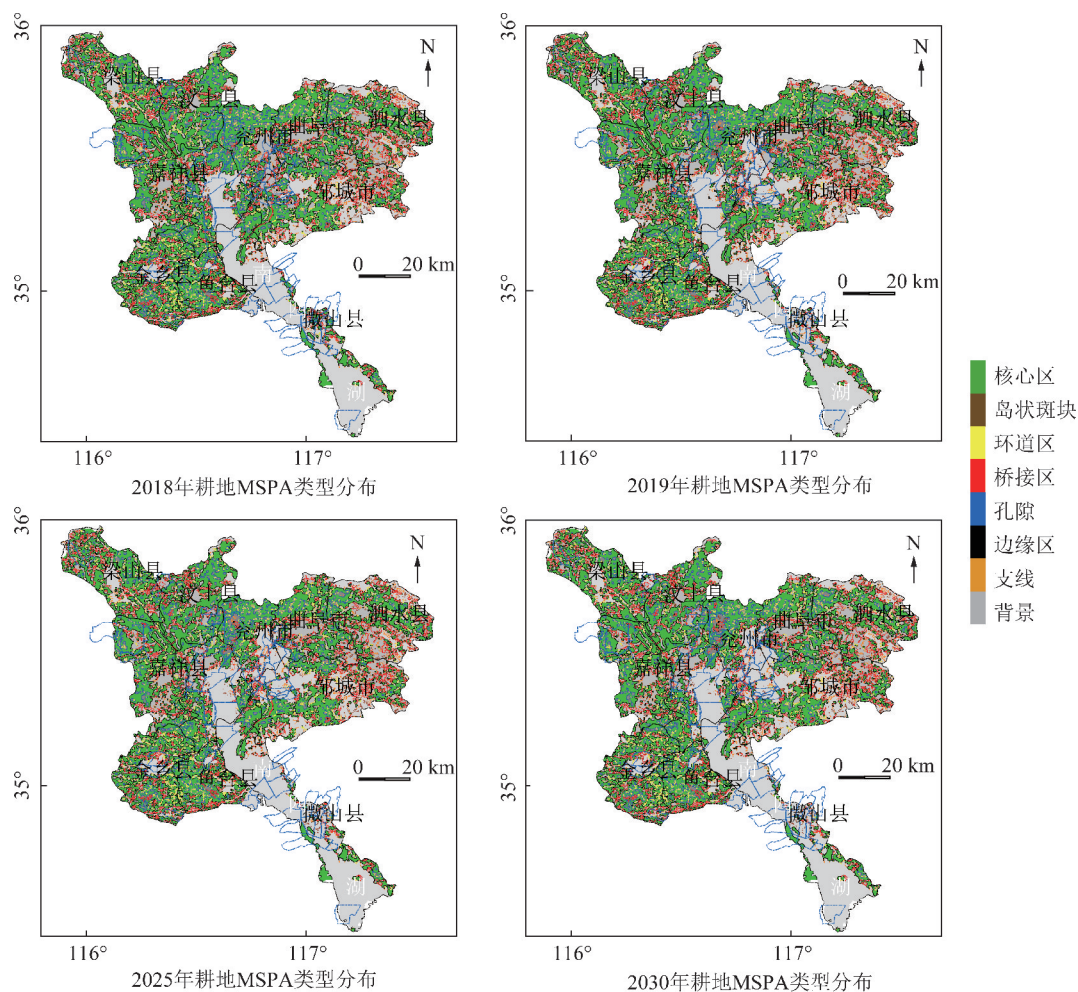


图 6 2018—2030 年边缘宽度 100 m 的耕地核心区 MSPA 类型分布

Fig. 6 Distribution of MSPA types in the core area of cultivated land with different edge widths in 2018—2030

表 5 2018—2030 年不同分辨率的耕地 MSPA 类型面积统计

Table 5 Statistics of cultivated land MSPA types with different resolutions from 2018 to 2030

MSPA 类型	2018 年面积/hm ²		2019 年面积/hm ²		2025 年面积/hm ²		2030 年面积/hm ²	
	30 m×30 m	100 m×100 m	30 m×30 m	100 m×100 m	30 m×30 m	100 m×100 m	30 m×30 m	100 m×100 m
核心区	639 504. 29	346 906. 02	613 976. 07	328 537. 18	609 335. 83	324 478. 06	606 804. 08	322 820. 17
岛状斑块	15. 75	3 781. 13	69. 21	4 683. 09	86. 13	5 000. 15	95. 04	5 025. 08
孔隙	37 210. 59	45 138. 21	35 025. 75	42 122. 67	34 884. 45	41 185. 38	34 652. 89	40 730. 12
边缘区	21 941. 55	141 963. 26	23 911. 29	137 938. 31	24 101. 37	138 032. 42	24 223. 14	137 708. 16
环道区	523. 71	44 125. 32	564. 21	42 339. 29	566. 82	42 200. 33	561. 42	41 769. 27
桥接区	399. 51	92 699. 43	551. 88	91 515. 62	547. 11	91 415. 21	538. 20	91 655. 31
支线	1 834. 74	26 816. 77	2 096. 37	29 058. 62	2 114. 91	29 325. 07	2 101. 41	29 268. 07
总计	701 430. 14	701 430. 14	676 194. 78	676 194. 78	671 636. 62	671 636. 62	668 976. 18	668 976. 18

同时,塌陷区周围连片性耕地斑块也逐渐消退。1 pixel 阈值下 2018 年塌陷区周围耕地面积 97 048. 05 hm²,到 2019 年减少 24 332. 26 hm²,减少主要位于东滩煤矿、唐口煤矿、新驿煤矿、兴隆煤矿和岱庄煤矿塌陷区;预测 2025、2030 年耕地面积将减少 28 685. 01 和 30 999. 63 hm²,其中 2030 年东滩煤矿

耕地损毁最严重,面积将减少 2 550. 75 hm²。相比 2 pixel 阈值下识别 2018 年塌陷周围耕地 47 179. 025 hm²,更加说明边缘阈值越大对于面积较小的耕地斑块识别度不高。

如图 7 所示,在 1 pixel 阈值下的 MSPA 分析统计济宁市 2018—2030 年分别形成 1 499,1 786,1 810

和1 812个耕地核心斑块,其中2018—2019年间耕地斑块数量增加幅度最为明显,主要变化位于市辖区、兖州市和邹城市,并且耕地消退以及破碎现象由内向四周扩散,到2030年围绕塌陷区周围的耕地斑块逐渐消失且破碎现象更加明显;2 pixel 阈值下识别的耕地核心区斑块面积大量减少,斑块数分别为1 362,1 382,1 384和1 387个;同时,煤矿内耕地核心区在1 pixel 阈值下斑块数量变化也较为突出,表明斑块数量随着边缘宽度的增加而减少,此时存在更多独立的耕地斑块以及内部结构也发生改变,斑块破碎加剧,连通性下降。如果从济宁市耕地布局的整体层次性考虑,2 pixel 阈值的设定能有效发现耕地分布较薄弱的区域和关键斑块,也能为今后降低耕地破碎化现象提供基础思路。研究中发现岛状斑块数量持续增加,表明耕地破碎度逐渐变大。单从耕地斑块数量统计情况来看,济宁市因采煤塌陷导致耕地的破碎程度不断增加,而且在1 pixel 阈值下的 MSPA 分析更能较好的反映研究区耕地破碎化状况。

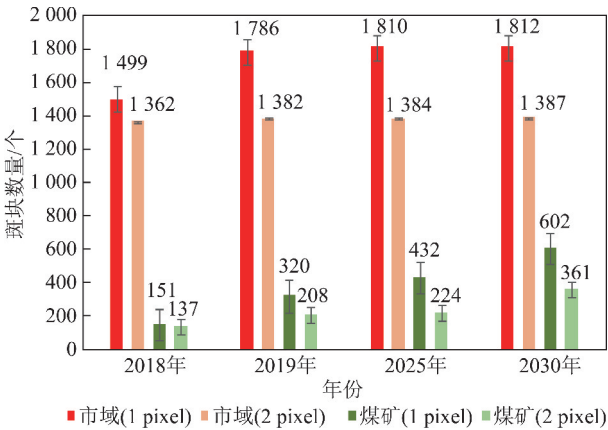


图7 2018—2030年不同边缘宽度的耕地核心斑块数量变化
Fig. 7 Changes in the number of cultivated land core patches with different edge widths in 2018—2030

斑块重要指数(I_{dpc})能表征济宁市重要耕地分布情况,且不同边缘阈值对斑块重要指数变化影响较大。根据式(2),(3)进行2018—2030年耕地核心区斑块的重要度计算,随着阈值的增加 I_{dpc} 指数明显下降(图8,9)。

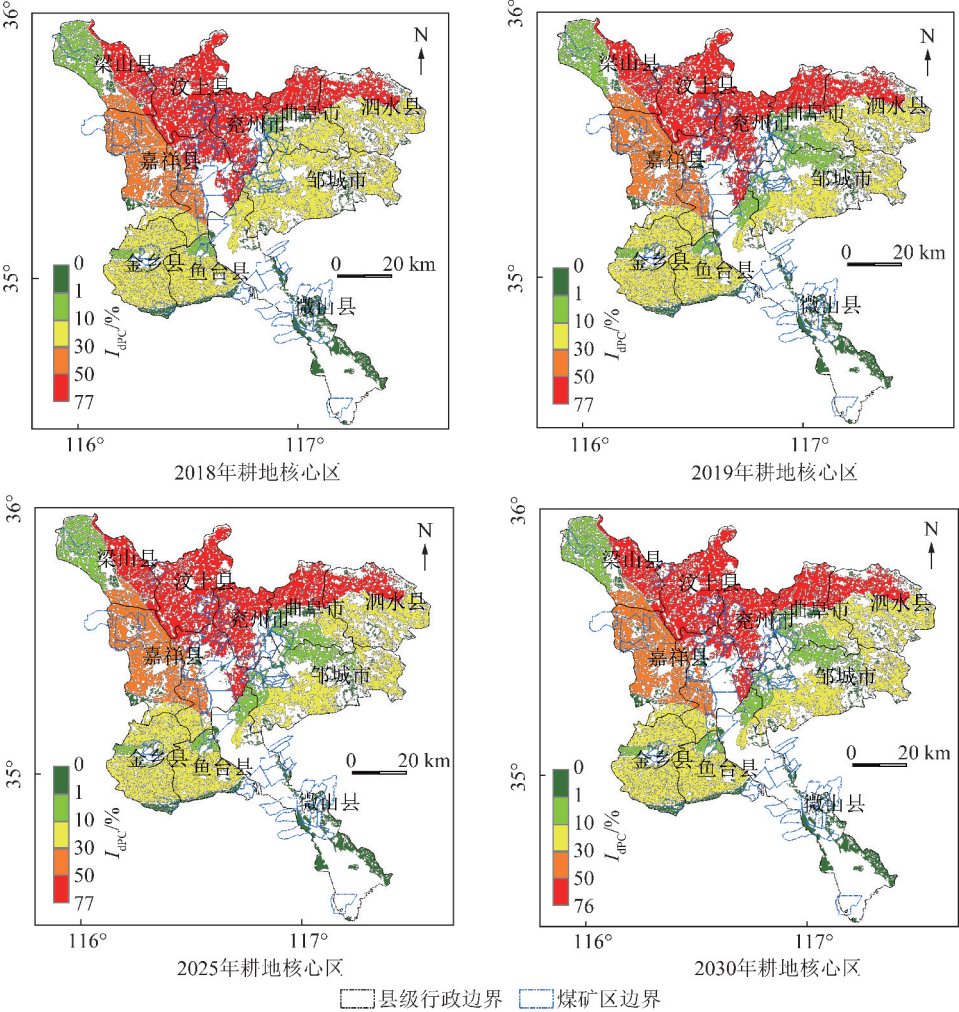


图8 2018—2030年边缘宽度30 m的耕地核心区重要度分布

Fig. 8 Importance distribution of cultivated land core areas with different edge width in 2018—2030

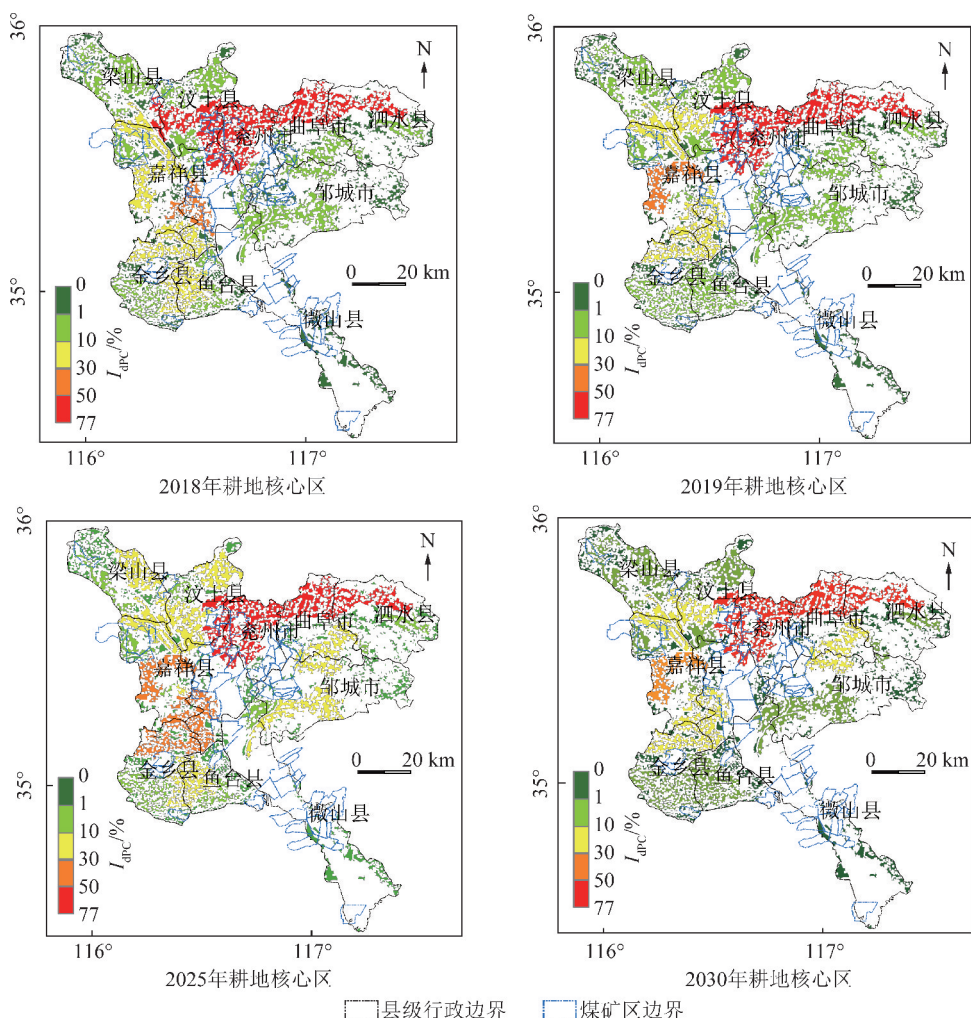


图9 2018—2030 年边缘宽度 100 m 的耕地核心区重要度分布

Fig. 9 Importance distribution of cultivated land core areas with different edge width in 2018—2030

1 pixel 阈值下的耕地核心区密集度较大, I_{dpc} 值较高区域主要分布在汶上县、市辖区北部、兖州市、曲阜市和泗水县北部, 南部微山县耕地核心区较为分散且 I_{dpc} 值相对较低。受塌陷影响使耕地 I_{dpc} 值变化最大的分布于邹城市和曲阜市, 随着塌陷面积的不断增加导致耕地重要区域逐渐退化。边缘阈值为 1 pixel 时, 斑块的重要值表现较为突出; 当边缘阈值为 2 pixel 时, 巨型斑块的重要性比较明显, 而过小的耕地斑块重要性体现的较困难。因此阈值越小对于反映细小斑块的重要效果较好。另外, 塌陷对于大型斑块的重要度没有明显变化, 但是有个别中型斑块的重要性降低。离塌陷区域越远, 耕地重要度影响越小。根据 1 pixel 计算, 在未来的 10 a, 耕地一级核心区面积将减少 15 772 hm^2 (图 10)。

通过不同边缘宽度对比中发现, 阈值越大导致过小的耕地核心斑块消失。为能够更好地识别因采煤塌陷损毁过小的耕地图斑, 采用 1 pixel 进行耕地连接度的评价最为合适。根据式(4)选取 I_{nc} 指数进行

连接度等级划分。如图 11 所示, 塌陷严重的兖州市、曲阜市和邹城市交界处, 2018 年耕地斑块处于 3 级连接区, 在 2019 年下降为 4 级; 邹城市西部耕地斑块在 1 a 间由 3 级连接区下降为 5 级连接区。由于耕地大面积损毁, 斑块之间形成连接的断面, 破碎度持续增大。

表 6 统计了济宁市 2018—2030 年不同耕地连接度的面积大小。到 2030 年, 1 级连接区面积和 2 级连接区减少 15 772.00 hm^2 和 3 290.00 hm^2 , 减少的面积位于曲阜市和邹城市塌陷区, 且更多向 3 级和 5 级连接区转化, 分别增加 20 877.60 hm^2 和 35 217.21 hm^2 ; 4 级连接区面积减少的面积最大为 114 087.39 hm^2 , 同时 5 级和 6 级连接区面积增加表明济宁市耕地整体连通性大幅下降。整体而言, 2018—2030 年, 济宁市因采煤塌陷致使耕地连接等级逐年下降, 耕地的物质迁移困难加剧。

鉴于济宁市各煤矿的耕地分布以及面积差异, 且 1 500 m 连通阈值不能很好的表征煤矿区的耕地

变化,根据济宁市 61 个煤矿边界范围,通过 MSPA 分析各煤矿区耕地连接度。相比整个市域的耕地面积,煤矿区所占的耕地比例较小,因此研究单个煤矿耕地破碎度时,调整距离阈值为 100 m,连通概

率设为 0.5 分别进行局部区域计算。根据自然断点法和结果权重将其分为 10 个等级。如图 12 所示,随着塌陷面积的不断增加(表 7),各煤矿耕地 I_{LIC} 指数变化明显。

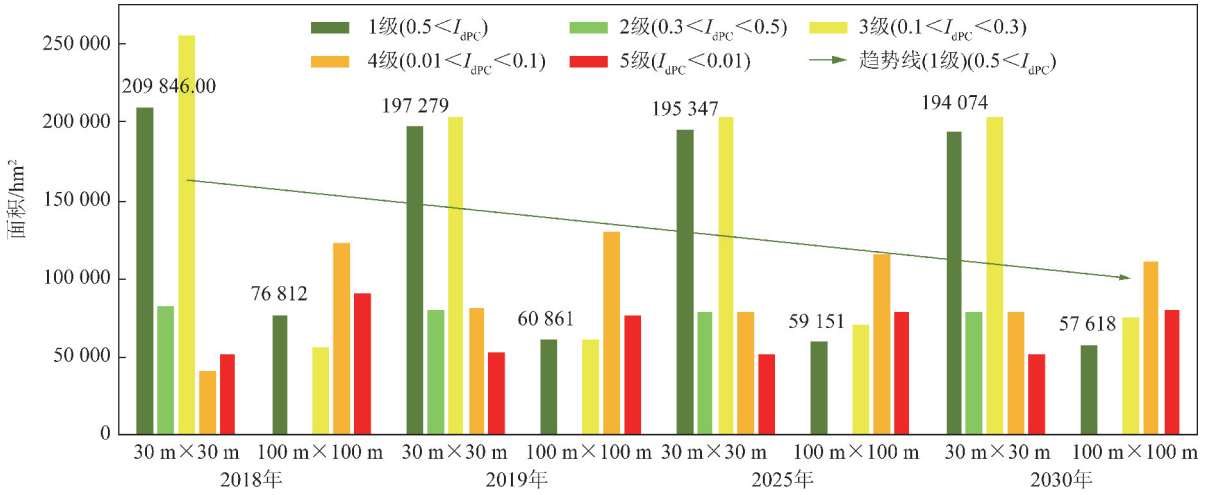


图 10 2018—2030 年不同边缘宽度的耕地核心区重要等级统计

Fig. 10 Grading statistics of the core area of cultivated land with different edge widths in 2018—2030

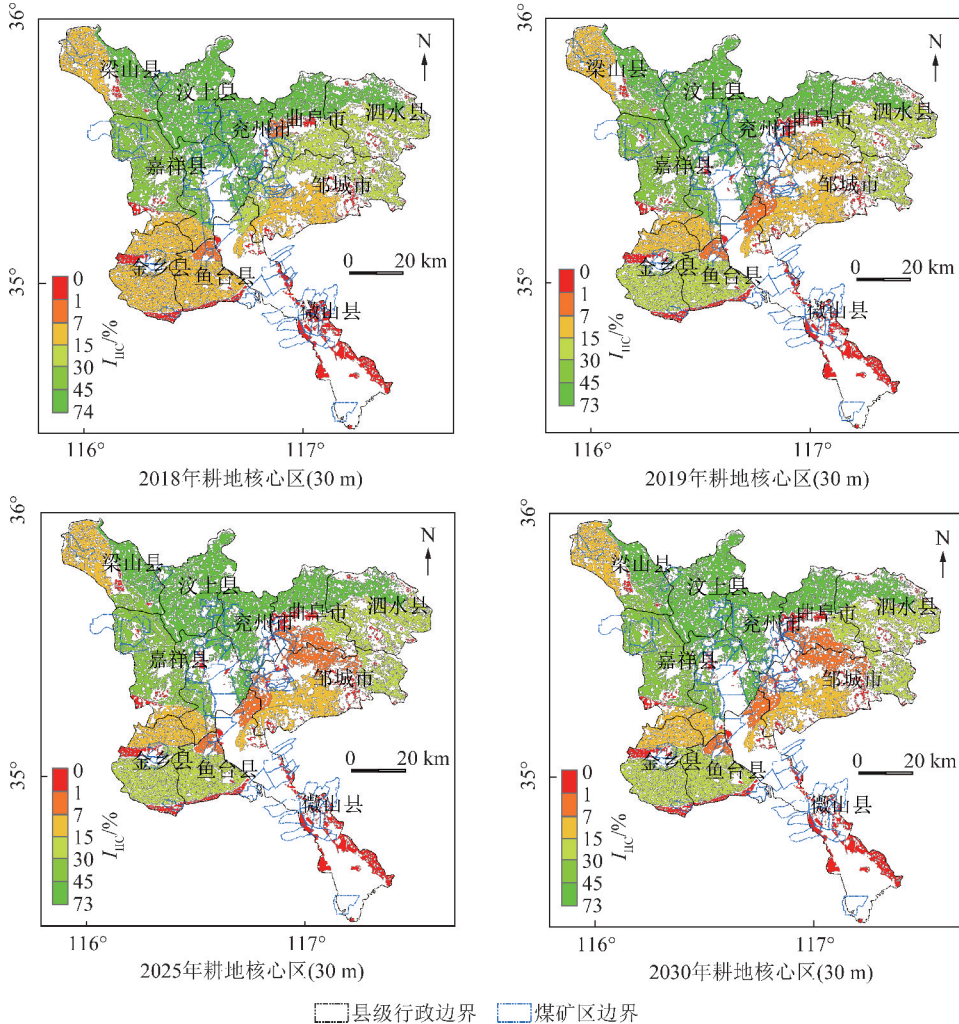


图 11 2018—2030 年耕地核心区连接度变化分布 (30 m × 30 m)

Fig. 11 Distribution of connectivity in the core area of cultivated land in 2018—2030 (30 m × 30 m)

表 6 2018—2030 年耕地核心区连接度分级面积统计

Table 6 Statistics of the graded area of connectivity of the core area of cultivated land in 2018—2030

I_{HC} 分级	面积/hm ²			
	2018 年	2019 年	2025 年	2030 年
1 级 ($0.45 < I_{HC}$)	209 846.00	197 279.00	195 347.00	194 074.00
2 级 ($0.30 < I_{HC} < 0.45$)	82 486.80	79 958.90	79 209.30	79 196.80
3 级 ($0.15 < I_{HC} < 0.30$)	110 490.70	131 563.00	131 453.40	131 368.30
4 级 ($0.07 < I_{HC} < 0.15$)	172 477.40	128 700.50	65 629.50	58 390.01
5 级 ($0.01 < I_{HC} < 0.07$)	9 578.16	17 593.79	45 269.44	44 795.37
6 级 ($I_{HC} < 0.01$)	54 625.23	58 880.88	92 427.19	98 979.60
总计	639 504.29	613 976.07	609 335.83	606 804.08

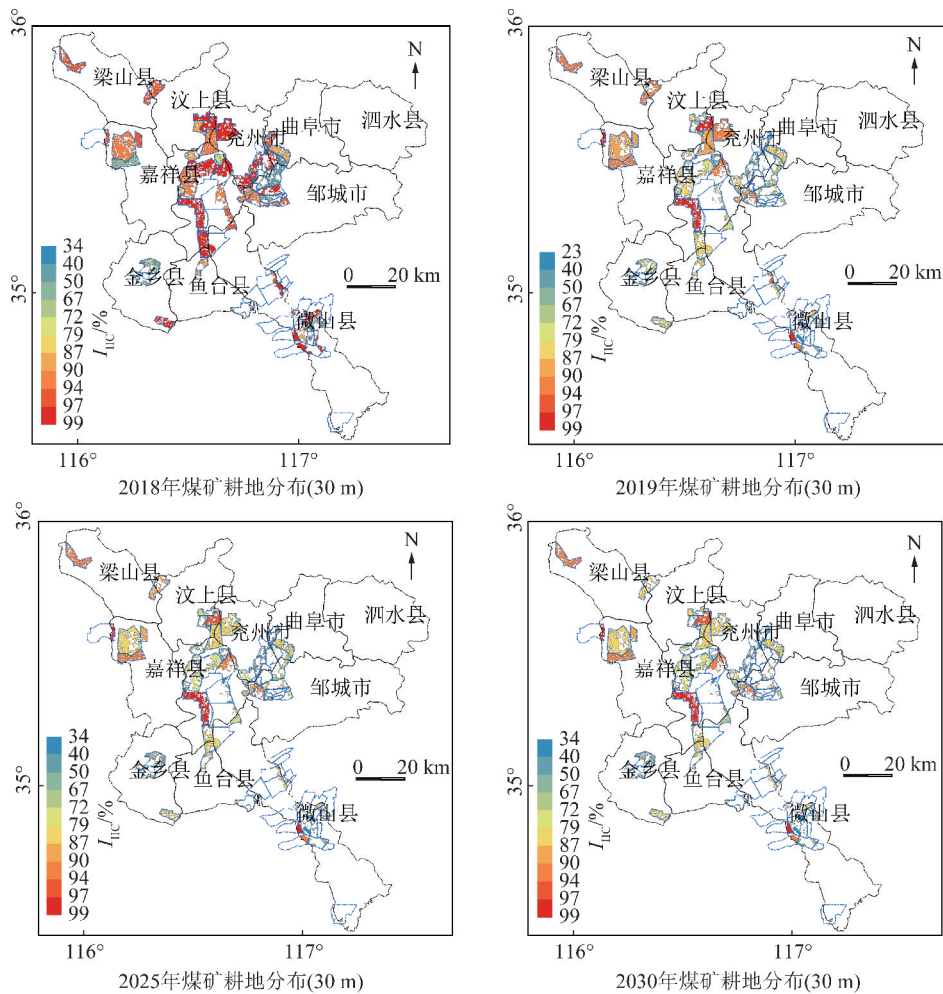


图 12 2018—2030 年各煤矿耕地连接度分类 (30 m×30 m)

Fig. 12 Classification map of cultivated land connectivity of various coal mines in 2018—2030 (30 m×30 m)

3 讨 论

边缘阈值的选择需要考虑多方面的因素,同时还必须考虑景观连通性的可执行性和满足不同层次的目的需求。在 1 pixel 和 2 pixel 阈值下的景观分析中发现斑块数量随着边缘宽度的增加而减少,斑块之间连接的内部结构也发生改变,独立耕地斑块的出现使得斑块破碎加剧,连通性下降。如果从济宁市和各煤

矿区耕地布局的整体层次性考虑,2 pixel 阈值的设定能有效发现耕地分布较薄弱的区域和关键斑块。如果要突出耕地要素更细小的破碎现象,需要更低的边缘阈值,为今后降低耕地破碎化现象提供基础思路。

斑块重要指数 (I_{dpc}) 和整体连通性指数 (I_{HC}) 进行定量化分析时,边缘阈值的选择与城市耕地斑块现状、以及塌陷区周围耕地分布密切相关,在调整耕地布局的初期阶段,采用较大的距离阈值比较容易发现

表 7 2018—2030 年各煤矿耕地连接度变化及面积统计
Table 7 Changes of cultivated land connectivity and area statistics of coal mines in 2018—2030

煤矿	2018 年		2019 年		2025 年		2030 年		2018—2030 年 平均 I_{LIC} 值变化
	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	
宏阳煤矿	0.92	2 719.96	0.92	2 719.68	0.92	2 719.68	0.92	2 719.68	0
双合煤矿	0.87	161.47	0.87	161.47	0.87	161.47	0.87	161.47	0
昭阳煤矿	0.79	99.32	0.79	99.32	0.79	99.32	0.79	99.32	0
徐庄煤矿	0.99	732.79	0.98	731.69	0.98	731.69	0.98	731.69	-0.01
彭庄煤矿	0.98	715.66	0.98	714.36	0.97	714.36	0.97	714.36	-0.01
义能煤矿	0.99	2 464.28	0.98	2 412.82	0.97	2 381.83	0.97	2 369.25	-0.02
杨营煤矿	0.96	2 916.96	0.94	2 891.85	0.94	2 891.85	0.94	2 891.85	-0.02
里彦煤矿	0.94	1 327.36	0.90	870.81	0.90	866.67	0.90	866.67	-0.04
太平煤矿	0.92	1 473.68	0.88	1 214.83	0.88	1 214.83	0.88	1 214.83	-0.04
鲁西煤矿	0.92	4 510.94	0.88	4 244.27	0.87	4 048.25	0.87	3 885.53	-0.05
星村煤矿	0.89	2 312.55	0.86	2 212.86	0.86	2 212.86	0.84	2 192.85	-0.05
许厂煤矿	0.99	3 101.22	0.93	2 044.56	0.93	2 044.56	0.93	2 044.56	-0.06
红旗煤矿	0.95	1 274.70	0.88	1 161.75	0.88	1 161.75	0.88	1 161.75	-0.07
花园煤矿	0.72	633.33	0.65	632.09	0.65	632.09	0.65	632.09	-0.07
安居煤矿	0.99	4 842.03	0.91	4 701.82	0.91	4 701.82	0.91	4 701.82	-0.08
新河煤矿	0.84	545.39	0.82	401.05	0.76	272.36	0.76	272.36	-0.08
鹿洼煤矿	0.89	1 155.85	0.86	1 018.15	0.84	831.72	0.80	752.26	-0.09
梁宝寺煤矿	0.92	6 842.35	0.88	6 015.58	0.83	5 956.00	0.83	5 956.00	-0.09
付村煤业	0.40	821.55	0.37	540.82	0.32	486.64	0.30	420.92	-0.10
崔庄煤矿	0.34	154.62	0.24	78.58	0.24	78.58	0.24	78.45	-0.10
滨湖煤矿	0.95	477.57	0.95	399.82	0.87	283.38	0.83	200.67	-0.12
田陈煤矿	0.89	441.46	0.77	275.74	0.77	275.74	0.77	275.74	-0.12
义桥煤矿	0.99	1 440.72	0.86	992.18	0.86	977.18	0.86	977.13	-0.13
阳城煤矿	0.97	3 140.37	0.91	2 708.65	0.88	2 299.33	0.84	2 082.13	-0.13
宵云煤矿	0.99	1 605.15	0.87	1 484.35	0.85	1 378.96	0.85	1 378.96	-0.14
新驿煤矿	0.99	4 878.69	0.92	4 146.03	0.87	3 671.73	0.85	3 327.49	-0.14
唐口煤矿	0.92	4 786.87	0.83	3 291.44	0.78	2 787.20	0.78	2 787.20	-0.14
蔡园煤矿	0.96	234.83	0.91	164.58	0.86	164.58	0.81	164.58	-0.15
欢城煤矿	0.87	523.97	0.72	342.64	0.72	274.68	0.72	274.68	-0.15
葛亭煤矿	0.88	1 222.51	0.83	739.62	0.72	739.62	0.72	739.62	-0.16
北宿煤矿	0.66	809.87	0.50	218.80	0.50	218.80	0.50	218.80	-0.16
南屯煤矿	0.99	1 712.00	0.81	719.46	0.81	696.35	0.81	696.17	-0.18
蒋庄煤矿	0.98	1 182.25	0.86	518.58	0.81	391.98	0.80	348.07	-0.18
唐村煤矿	0.96	753.18	0.78	352.96	0.78	352.96	0.78	352.96	-0.18
何岗煤矿	0.78	1 185.50	0.62	797.52	0.60	726.28	0.60	606.70	-0.18
王楼煤矿	0.99	4 059.91	0.82	3 169.04	0.80	2 750.60	0.80	2 750.60	-0.19
新安煤业	0.99	532.86	0.82	486.96	0.80	482.03	0.80	481.76	-0.19
金桥煤矿	0.83	1 834.04	0.76	1 604.64	0.65	1 604.64	0.64	1 604.64	-0.19
田庄煤矿	0.99	2 099.21	0.83	1 378.53	0.79	1 282.40	0.79	1 282.40	-0.20
落陵煤矿	0.91	691.48	0.76	390.12	0.72	390.12	0.71	390.12	-0.20
鲍店煤矿	0.50	1 118.15	0.38	410.88	0.31	330.61	0.28	252.87	-0.22

续 表

煤矿	2018 年		2019 年		2025 年		2030 年		2018—2030 年
	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	平均 I_{LIC} 值	耕地面 积/hm ²	平均 I_{LIC} 值变化
东滩煤矿	0.79	3 841.13	0.62	2 214.95	0.60	1 762.32	0.57	1 290.38	-0.22
岱庄煤矿	0.98	3 607.01	0.76	2 296.83	0.73	2 296.11	0.73	2 296.11	-0.25
济宁三号煤矿	0.97	1 814.87	0.76	1 304.29	0.74	1 185.76	0.72	1 130.97	-0.25
运河煤矿	0.99	928.41	0.72	499.19	0.72	499.19	0.72	499.19	-0.27
兴隆煤矿	0.99	1 870.72	0.72	544.00	0.70	487.39	0.68	440.14	-0.31
唐阳煤矿	0.88	1 539.16	0.72	886.17	0.66	659.48	0.57	541.04	-0.31
柴里煤矿	0.50	404.00	0.30	111.79	0.21	65.71	0.18	51.83	-0.32
杨村煤矿	0.99	1 505.72	0.68	659.68	0.65	648.39	0.65	648.39	-0.34
金源煤矿	0.99	665.65	0.58	666.06	0.58	666.06	0.58	666.06	-0.41
王晁煤矿	0.99	326.00	0.85	189.17	0.72	118.61	0.57	99.74	-0.42
级索煤矿	0.97	68.08	0.62	59.00	0.50	32.31	0.50	32.28	-0.47
单家村煤矿	0.92	382.81	0.46	141.68	0.44	112.56	0.44	112.56	-0.48
古城煤矿	0.96	1 065.81	0.47	479.44	0.47	464.75	0.47	464.75	-0.49
三河口煤矿	0.99	313.55	0.64	120.59	0.56	92.79	0.48	78.62	-0.51
杨庄煤矿	0.99	704.10	0.48	375.65	0.48	375.65	0.48	375.65	-0.51
横河煤矿	0.99	440.83	0.47	234.64	0.46	234.64	0.44	234.64	-0.55
济宁二号煤矿	0.93	1 890.93	0.68	983.82	0.38	755.82	0.38	622.97	-0.55
高庄煤业	0.90	1 011.53	0.34	836.84	0.32	781.49	0.32	740.11	-0.58
北徐楼煤矿	0.99	47.15	0.99	42.21	0.35	10.42	0.35	10.42	-0.64
岱庄生建煤矿	0.86	482.87	0.23	38.69	0.23	34.43	0.21	25.00	-0.65

耕地连通性的薄弱区域;而在煤矿区耕地面积较少,需适当减小距离阈值来反映不同煤矿区景观要素或不同时期耕地斑块的连接度。因此,适宜距离阈值可作为城市耕地以及采煤塌陷区域耕地连接度的一个评价指标。

煤炭开采活动损坏了原生地貌^[27-28]和地表植被^[29],造成耕地消退、房屋倒塌,农民生活困难。在矿区采煤塌陷逐渐扩张情况下,通过建立有效的耕地复垦机制,结合先进的复垦技术来增加耕地连接度是当前最有效的解决办法。因此需要在现存的复垦法规基础上,总结经验教训,尽快完善和出台科学的土地复垦法律,完善复垦机制,强化政府部门监督管理权力,鼓励矿业集团以及社会力量参与复垦工作,更能够缓解“政-企-民”之间的矛盾,稳定社会秩序。另外,要正确处理好生态发展与经济发展的关系^[30-31]。只有在生态优先的前提下,才能保证“失衡生态—经济发展”的协同推进。目前我国人多地少的现状更加强调农业用地的复垦和补充,但是由于技术受限而导致耕地复垦的成本较高、复垦周期长。因此需要结合现代农业发展理念,充分利用塌陷积水的特征,实现“农业-渔业-畜牧业”的现代生态农业,促

进采煤塌陷地区经济的转型。另外还要加强对采煤工艺的革新、复垦技术的研发以及资金支持来约束采煤塌陷对土地的进一步损害。

采煤塌陷作为中国煤炭型城市建设、农业生产中存在的突出问题,其导致的耕地破碎化研究已成为当前国土整治与修复、耕地保护与管理、农业生产等领域关注的热点。而在耕地资源尚不集聚、煤炭扰动频繁的双重压力下,宏观尺度下的耕地资源破碎化是导致微观破碎化的基础。根据济宁市矿业集团村庄搬迁安置规划,到 2020 年底,搬迁压煤村庄 60 个,所占山东省搬迁比例的 40.82%。土地复垦是一项长期而复杂的工作^[32]。国内学者已经在采煤塌陷充填复垦^[33-35]、“边采边复”技术^[36-38]研究不断突破。但是在当前采煤扰动导致耕地损毁进行土地复垦工作仍然存在技术受限、复垦成本增加等问题,需在优先解决土地复垦政策困境的基础上,为破解微观耕地破碎障碍提供科学的支撑。

4 结 论

(1) 未来 10 a 济宁市煤炭资源开采量持续增长,塌陷区域不断扩张。到 2025 年预测塌陷区面积

47 327.50 hm²,到2030年预测塌陷区面积50 613.52 hm²。在未来10 a预测耕地面积将损毁32 603.65 hm²,建设用地损毁7 542.25 hm²。各煤矿区中东滩煤矿损毁耕地最严重为2 550.75 hm²。

(2)边缘宽度阈值设定将会导致斑块数量以及内部连接度显著变化。通过选取1 pixel和2 pixel边缘宽度的计算对比发现:在1 pixel阈值下的MSPA分析2018—2030年分别形成1 499,1 786,1 810和1 812个耕地斑块,对于表征塌陷导致的耕地破碎化作用明显;2 pixel阈值下分析耕地核心斑块数量变化差异较小。

(3)根据济宁范围内耕地核心区 I_{dpc} 指数、 I_{nic} 指数及面积统计,在2018—2030年耕地重要核心区主要分布于市域北部和中部,而且塌陷对大面积耕地斑块 I_{dpc} 值影响较小,对塌陷周围的中小型耕地斑块影响较大;济宁市各煤矿内耕地呈现破碎零散的分布状态,且小尺度的煤矿区耕地面积变化,能够诱导周围大片区域耕地重要区域持续消退,相互作用降低,连接度下降。

(4)不同的煤矿区资源赋存、生产利用状况不同,导致不同矿区耕地破碎化特征明显差异。其中岱庄生建煤矿、北徐楼煤矿平均 I_{nic} 值预测在未来10 a间连接度逐渐下降,分别减少0.65和0.64,破碎化加剧;另外高庄煤矿、横河煤矿、济宁二号煤矿、三河口煤矿和杨庄煤矿平均 I_{nic} 值也出现较大程度的下降,减少分别为0.58,0.55,0.55,0.51和0.51。因此,在未来10 a,各煤矿区需要有针对性的进行耕地复垦从而减少耕地破碎度的激增。

本研究在前人研究采煤塌陷成果的基础上,完善了传统耕地破碎度评价体系,丰富了破碎化的概念内涵,拓展了耕地破碎化的研究尺度,为新时期国土整治与生态修复、塌陷地复垦规划、基本农田保护规划,推进农业现代化建设、保障粮食安全提供有益借鉴。但受数据资料收集限制,本文重点探讨了市域和煤矿尺度下因采煤塌陷引起的耕地破碎化动态演变,而其他导致耕地破碎的原因并未讨论。因此,在耕地破碎化的认知与类型分区的基础上,仍需深入解析。

参考文献(References):

[1] 彭苏萍,毕银丽.黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J].煤炭学报,2020,45(4):1211-1221.

PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.

[2] 钱鸣高,许家林.煤炭开采与岩层运动[J].煤炭学报,2019,

44(4):973-984.

QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973-984.

[3] 毕银丽,伍越,张健,等.采用HYDRUS模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律[J].煤炭学报,2020,45(1):360-367.

BI Yinli, WU Yue, ZHANG Jian, et al. Simulation of soil water and salt movement in mining ground fissure zone based on HYDRUS[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 360-367.

[4] 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J].煤炭学报,2017,42(1):17-26.

WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17-26.

[5] 卞正富,于昊辰,侯竞,等.西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估[J].煤炭学报,2020,45(1):338-350.

BIAN Zhengfu, YU Haochen, HOU Jing, et al. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 338-350.

[6] HU Zhenqi, YANG Guanghua, XIAO Wu, et al. Farmland damage and its impact on the overlapped areas of cropland and coal resources in the eastern plains of China[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2014, 86: 1-8.

[7] 胡振琪,肖武,赵艳玲.再论煤矿区生态环境“边采边复”[J].煤炭学报,2020,45(1):351-359.

HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 351-359.

[8] 李晶,胡振琪,李立平.中国典型市域煤粮复合区耕地损毁及其影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(1):148-151.

LI Jing, HU Zhenqi, LI Liping. Farmland damage and its impacts in overlapped areas of cropland and coal resources in one typical city of China[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(1): 148-151.

[9] 王义方,李新举,李富强,等.基于多时相遥感影像的采煤塌陷区典型扰动轨迹识别——以山东省济宁市典型高潜水位矿区为例[J].地质学报,2019,93(S1):301-309.

WANG Yifang, LI Xinju, LI Fuqiang, et al. Identification of typical disturbance trajectory in coal mining subsidence area based on multi-temporal remote sensing images[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(S1): 301-309.

[10] 李鹏山,吕雅慧,张超,等.基于核密度估计的京津冀地区耕地破碎化分析[J].农业机械学报,2016,47(5):281-287.

LI Pengshan, LÜ Yahui, ZHANG Chao, et al. Analysis of cultivated land fragmentation in Beijing-Tianjin-Hebei region based on kernel density estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 281-287.

[11] TESHOME Menberu. Population growth and cultivated land in rural Ethiopia: Land use dynamics, access, farm size, and fragmentation[J]. Resources and Environment, 2014, 4(3): 14.

[12] STOKES C J, MCALLISTER R R J, ASH A J. Fragmentation of

- Australian rangelands: Processes, benefits and risks of changing patterns of land use[J]. *The Rangeland Journal*, 2006, 28(2): 83-96.
- [13] IRWIN E G, BOCKSTAEL N E. The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20672-20677.
- [14] JEFFERY W, BENTLEY. Economic and ecological approaches to land fragmentation: In defense of a much-maligned phenomenon[J]. *Annual Review of Anthropology*, 1987, 16: 31-67.
- [15] 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 Jianlin, CHEN Yuqi, JIANG Qingxia, et al. Research on the reasons and countermeasures of cultivated land fragmentation in China[J]. *Agricultural Economy*, 2006(6): 21-23.
- [16] 焦利民, 肖丰涛, 许刚, 等. 武汉都市区绿地破碎化格局对城市扩张的时空响应[J]. *资源科学*, 2015, 37(8): 1650-1660.
- JIAO Limin, XIAO Fengtao, XU Gang, et al. Spatial-temporal response of green land fragmentation patterns to urban expansion in Wuhan metropolitan area[J]. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1650-1660.
- [17] 陈帷胜, 冯秀丽, 马仁锋, 等. 耕地破碎度评价方法与实证研究——以浙江省宁波市为例[J]. *中国土地科学*, 2016, 30(5): 80-87.
- CHEN Weisheng, FENG Xiuli, MA Renfeng, et al. Method of cultivated land fragmentation evaluation and empirical research: A case of Ningbo city in Zhejiang Province[J]. *China Land Sciences*, 2016, 30(5): 80-87.
- [18] SANTIAGO Saura, JOSEP Torné. Conefor sensinode 2. 2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2009, 24(1): 135-139.
- [19] 史芳宁, 刘世梁, 安毅, 等. 城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究——以昆明市为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3303-3314.
- SHI Fangning, LIU Shidong, AN Yi, et al. Changes of landscape fragmentation and connectivity with urbanization: A case study of Kunming[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3303-3314.
- [20] 郭家新, 胡振琪, 李海霞, 等. 基于 MCR 模型的城市生态空间网络构建[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 275-284.
- GUO Jiaxin, HU Zhenqi, LI Haixia, et al. Construction of municipal ecological space network based on MCR Model: A case study of tangshan city[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 275-284.
- [21] 邓喀中, 张冬至, 张周权. 深部开采条件下地表沉降预测及控制探讨[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(1): 52-55.
- DENG Kazhong, ZHANG Dongzhi, ZHANG Zhouquan. Study on prediction and control of surface subsidence in deep mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(1): 52-55.
- [22] 吴侃, 靳建明. 时序分析在开采沉陷动态参数预计中的应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(4): 73-75.
- WU Kan, JIN Jianming. Prediction of dynamic mining subsidence parameters by time series analysis method[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(4): 73-75.
- [23] 曹翊坤, 付梅臣, 谢苗苗, 等. 基于 LSMM 与 MSPA 的深圳市绿色景观连通性研究[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 526-536.
- CAO Yikun, FU Meichen, XIE Miaomiao, et al. Landscape connectivity dynamics of urban green landscape based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and linear spectral mixture model (LSMM) in Shenzhen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 526-536.
- [24] 刘常富, 周彬, 何兴元, 等. 沈阳城市森林景观连接度距离阈值选择[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2508-2516.
- LIU Changfu, ZHOU Bin, HE Xingyuan, et al. Selection of distance thresholds of urban forest landscape connectivity in Shenyang City[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2508-2516.
- [25] LUCÍA P H, SANTIAGO S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: Towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation[J]. *Landscape Ecology*, 2006, 2(7): 959-967.
- [26] LUCÍA P H, SANTIAGO S. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(2): 91-103.
- [27] 陈超, 胡振琪. 我国采动地裂缝形成机理研究进展[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(3): 810-823.
- CHEN Chao, HU Zhenqi. Research advances in formation mechanism of ground crack due to coal mining subsidence in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 810-823.
- [28] CHUGH Yoginder P. Concurrent mining and reclamation for underground coal mining subsidence impacts in China[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2018, 5(1): 18-35.
- [29] 吴春花, 杜培军, 谭琨. 煤矿区土地覆盖与景观格局变化研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(6): 1026-1033.
- WU Chunhua, DU Peijun, TAN Kun. Analyzing land cover and landscape pattern change in coal mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(6): 1026-1033.
- [30] 李新举, 张志国, 李玉环, 等. 论耕地保护与城镇发展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2000, 10: 31-32.
- LI Xinju, ZHANG Zhiguo, LI Yuhuan, et al. Discussion on cropland protection and city development[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2000, 10: 31-32.
- [31] CHENG Linlin, SKOUSEN Jeffrey G. Comparison of international mine reclamation bonding systems with recommendations for China[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2017, 4(2): 67-79.
- [32] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复 30 年: 回顾、反思与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 25-35.
- HU Zhenqi. The 30 years' land reclamation and ecological restoration in China: Review, rethinking and prospect[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 25-35.
- [33] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 276-280.
- LI Xinju, HU Zhenqi, LI Jing, et al. Research progress of reclaimed

- soil quality in mining subsidence area [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 276-280.
- [34] 胡振琪, 多玲花, 王晓彤. 采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 198-206.
- HU Zhenqi, DUO Linghua, WANG Xiaotong. Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 198-206.
- [35] 肖武, 胡振琪, 李太启, 等. 采区地表动态沉陷模拟与复垦耕地率分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 126-128.
- XIAO Wu, HU Zhenqi, LI Taiqi, et al. Dynamic subsidence simulation and land reclamation efficiency analysis of surface ground above mining block [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 126-128.
- [36] 胡振琪, 肖武, 王培俊, 等. 试论井工煤矿边开采边复垦技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 301-307.
- HU Zhenqi, XIAO Wu, WANG Peijun, et al. Concurrent mining and reclamation for underground coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 301-307.
- [37] 张瑞娅, 肖武, 胡振琪. 边采边复耕地区动态施工标高模型构建与实例分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2125-2133.
- ZHANG Ruiya, XIAO Wu, HU Zhenqi. Farmland dynamic construction elevation model of concurrent mining and reclamation and case study [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2125-2133.
- [38] 胡振琪, 肖武. 矿山土地复垦的新理念与新技术——边采边复[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 178-181.
- HU Zhenqi, XIAO Wu. New idea and new technology of mine land reclamation: Concurrent mining and reclamation [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 178-181.