DOI:10.19789/j.1004-9398.2024.05.004
文献引用:史静,曹倩倩,周丙锋.黄河流域下游煤矿区耕地时空演变及驱动力分析:以山东济宁为例[J].首都师范大学学报(自然科学版),2024,45(5):30-39. SHI J,CAO Q Q,ZHOU B F. Spatio-temporal evolution and driving force analysis of arable land in the coal mining area of the lower Yellow River Basin:the case of Jining City,Shandong Province[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2024,45(5):30-39.

黄河流域下游煤矿区耕地时空演变及驱动力分析:以山东济宁为例*

史　静,曹倩倩,周丙锋**

(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京　100048)

摘要:山东省济宁市地处黄河流域下游煤矿区,面临着耕地资源严重破坏等问题。本文基于济宁市1980—2020年土地利用数据和社会经济数据,借助土地利用转移矩阵和主成分分析方法,探究济宁市各县市区耕地时空变化特征和驱动机制,并采用灰色预测模型对未来耕地面积进行预测。结果表明:(1)济宁市耕地具有"西多东少"的典型特征,且耕地面积不断减少,工业、煤矿和交通建设用地面积不断增加;(2)1980—2020年济宁市耕地主要转出至建设用地、草地和水域,其中1980—1990年县市区耕地变化动态较高,2000—2010年耕地面积变化程度较小;(3)经济因素是引起耕地变化的主要驱动因素,且煤炭开采占国内生产总值比例和第二产业产值占总产值比例为影响耕地面积的主要驱动因子;(4)预测显示,2020—2035年耕地面积将继续呈减少趋势。因此,耕地保护政策的制定应该充分考虑经济因素,因地施策,推进资源节约型城市建设。

关键词:耕地;时空演变;驱动机制;灰色预测;济宁市
中图分类号:X37　　**文献标志码**:A

Spatio-temporal evolution and driving force analysis of arable land in the coal mining area of the lower Yellow River Basin: the case of Jining City, Shandong Province*

SHI Jing, CAO Qianqian, ZHOU Bingfeng**

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing　100048)

Abstract: Jining City of Shandong Province is located in the coal mining area of the lower reaches of the Yellow River Basin, facing serious problems such as the destruction of arable land resources. Based on the land use data and socio-economic data of Jining City from 1980 to 2020, this paper explores the spatial and temporal characteristics and the driving mechanism of arable land by land use transfer matrix and principal component analysis, and predicts the future arable land area by using the gray prediction model. The results show that: (1) arable land in Jining City exhibits a typical characteristic of "more in the west, less in the east" and a continual decrease, land areas for industrial, coal mining and transportation construction are increasing. (2) From 1980 to 2020, the predominant changes to arable

收稿日期:2023-11-07
* 国家自然科学基金项目(42171330)
** 通信作者:zbf@cnu.edu.cn

land in Jining City involved its conversion into construction land, grassland water bodies. Notably, from 1980 to 1990, there were significantly higher dynamics in arable land changes across counties and districts, whereas from 2000 to 2010, there were relatively minor fluctuations in arable land area.(3) Economic factors emerge as the primary driving forces behind changes in arable land, coal mining's proportion of the total industry output value and the secondary industry's share of the total output value are the principal determinants influencing arable land area.(4) Through forecasting, it is projected that the arable land area will continue to exhibit a decreasing trend from 2020 to 2035. In response, crafting arable land conservation policies should comprehensively account for economic factors, adopt tailored strategies based on local conditions, and propel the development of resource-efficient urban construction.

Keywords: arable land; time-space evolution; driving forces; grey prediction; Jining City

CLC: X37　　**DC**: A

0　引　言

耕地是地表覆盖的主要类型之一,是粮食生产的基石,是保障粮食安全、生态安全和可持续发展的基础。黄河流域粮食主产区承担着粮食安全和生态安全的双重任务。但我国黄河流域下游煤矿区因长期煤炭开采,地表塌陷现象严重[1-3],大量耕地被损毁,耕地资源现状严重滞后于粮食可持续高产的需求。在我国提出保障生态文明建设和粮食安全的重点时期,亟需揭示黄河流域煤矿区耕地资源的时空分布规律和解决煤矿区耕地资源合理利用与保护的问题。因此,研究黄河流域下游煤矿区耕地的时空分布和驱动因素,有助于维护国家粮食安全、促进生态环境保护,优化耕地资源结构、促进土地合理布局,是化解高质量发展背景下黄河流域发展与保护难题的应有之义[4]。

关于耕地资源时空分布[5-9]的研究,学术界已进行了诸多有益的探索,如对煤矿区和黄河流域耕地资源的研究。在煤矿区耕地资源研究方面,陈景平等[10]以安徽省凤台县为例,利用ArcGIS叠加分析对煤粮复合区耕地损毁的演变进行探究;石秀伟等[11]以山东省小尺度煤粮复合区为研究对象,对因采煤塌陷现象造成的耕地资源演变进行分析;张瑞娅等[12]以安徽省淮南某煤矿为例,利用矿区开采前后土地利用转移矩阵的方法,分析未来耕地面积变化。在黄河流域耕地资源研究方面,诸多学者主要关注耕地面积[13]和耕地质量[14]的时空变化特征,而黄河流域作为"粮袋子"的重要功能地带,使得学者们对黄河流域耕地资源的研究渐趋深入[15]。罗娅等[16]以黄河河口镇为研究区域,揭示出农用地转化为其他林地为主要土地利用类型变化现象;郭振华等[17]选取位于黄河中下游的河南省洛阳市为研究对象,揭示出2001—2009年新增建设用地的主要来源为耕地;李艳忠等[18]以黄河中游为例,研究得出耕地转向草地是主要的土地利用转换类型;张冉等[19]以整个黄河流域为研究对象,显示2015年与1980年相比,城乡工矿居民用地与水域面积变化最为明显。目前大部分研究是针对煤矿区、黄河流域部分地区或是对整个黄河流域进行研究,对煤矿区和黄河流域等复合区域耕地的研究相对有限。因此,有必要采用多种研究方法,以系统的方式深入分析黄河流域煤矿区耕地的变化。

对黄河流域下游煤矿区耕地资源进行时空分布和驱动因素研究:一方面可以明确煤矿区耕地资源利用情况,为研究区域土地整理提供决策支持;另一方面则为煤粮复合区耕地资源有序流转和规模化经营提供有益参考。济宁市位于黄河流域下游,在其脆弱的生态环境和煤矿塌陷的双重压力下,耕地资源受到前所未有的挑战,严重威胁了农业生产的可持续性,农业种植活动受到了显著制约。因此,本文对耕地进行定量分析,以便深入探讨耕地资源存在的问题。利用1980—2020年土地利用遥感影像数据和1996—2020年社会经济数据等,从时空分布角度对济宁市耕地变化情况进行分析,探究其驱动因素,并对未来耕地面积变化情况进行预测。通过本文研究可以明确现阶段济宁市面临的主要压力,为今后资源节约型城市建设、煤矿开采区土地复垦和农业结构调整等相关政策制定提供辅助支持。

1　研究区概况

济宁市位于黄河流域下游,山东省西南部,地形以东高西低、盆地为主,地理位置为115°51′~117°35′E,34°27′~35°58′N(图1,行政区域界线参考山东省标准地图,审图号鲁SG(2020)019)。济宁市耕地面积达6 100 km^2,占全市总面积的54.6%,在山东省以及华北地区属于大型的农业生产基地。

济宁市还拥有丰富的矿产资源,以煤炭资源为主。根据该市公开数据显示共有煤矿47处(图1),煤矿主要分布在兖州市、邹城市西部、任城区、曲阜市西部、鱼台县北部和汶上县南部(数据来自https://www.jindata.sd.gov.cn/jining/catalog/)。其中,兖州矿区和济宁矿区是最重要的煤炭开采区域,总含煤面积达到了4 830 km^2。根据勘探预测数据,济宁市矿区的煤炭储量估计达到了260亿t,占据了山东省煤炭储量的50%以上[4],全市煤炭保有资源量位居全省第一位。

尽管丰富的煤炭资源为地方经济发展提供了一定的动力,但煤炭开采活动也带来了一系列环境和土地问题。截至2020年,煤炭开采累计造成土地塌陷520 km^2(大部分是耕地)。济宁市位于黄河流域下游,面临着河流冲刷、水资源短缺和土壤盐碱化等问题,使得耕地困境愈发严重。在煤矿问题和黄河流域的双重影响下,对当地社会和生态环境构成了严峻的挑战。

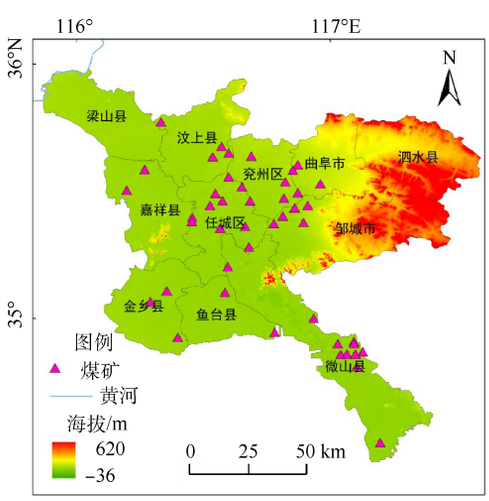


图1　济宁市地理位置及地形

2　研究方法与数据来源

2.1　数据来源

1980—2020年的土地利用遥感影像、行政区划、城市驻地数据及数字高程模型(digital elevation model,DEM)90 m数据均来源于中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn),本文根据现有的土地利用数据,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种,并将建设用地细分为工业、煤矿、交通(工矿交)建设用地和其他建设用地,工矿交建设用地变化可以反映煤矿用地变化情况,空间分辨率为1 km。1996—2020年耕地面积、驱动因素等数据,均来源于济宁市统计局(https://tjj.jining.gov.cn/)《济宁市统计年鉴》《济宁市国民经济和社会发展统计公报》。耕地面积数据以遥感影像数据作为补充,部分缺失数据采用插值法进行补全,由于耕地统计口径存在差异,本文对耕地面积进行了修正。

2.2　研究方法

2.2.1　土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是指不同时期不同土地利用类型间的迁移,通常用于分析不同地区土地利用类型的变动趋势和数量,以定量的方式来表明研究区土地利用类型的转移情况和走势。其数学模型为[20]

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{n1} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{S}_{ij}$表示的是土地利用类型开始i与结束j的面积变化;n表示各种土地利用类型数。

2.2.2　耕地相对变化率

耕地面积相对变化率是分析耕地变化情况的一个重要的指标,能反映各地区耕地面积与整个区域耕地面积变化的趋势及速率之间的相互关系。其公式为[21]

$$R=\frac{(S_a-S_b)\times A_a}{S_a\times(A_a-A_b)}, \tag{2}$$

式中:R是耕地的相对变化率;S_a、S_b分别是济宁市各市及县域研究期开始、结束的耕地面积;A_a和A_b分别表示济宁市研究期开始和结束时间的耕地总面积。

2.2.3　耕地变化动态

耕地变化动态度能较好地反映一定时期内研究区域耕地转入转出的活跃度,对某区域某一特定时期耕地变化幅度进行了定量评价,计算公式为[22]

$$K=\frac{|S_b-S_a|}{S_b}\times\frac{1}{T}\times 100\%, \tag{3}$$

式中:T为时间间隔,单位为a。K的值表示济宁市耕地变化的年变化率。

2.2.4　主成分分析

主成分分析法将多项原始指标提取为具有代表性的综合指标,包括原始指标中较为完整、清晰的信息,且各项综合指标是相互独立的[23]。

2.2.5　灰色预测模型

灰色系统预测模型是利用已知部分信息定量分析,以预测未来一定时间范围内事物的发展状况的模型,该模型已被广泛应用于社会经济方面的研究[24]。最简单的模型是GM(1,1),其能够对原始非负离散数据进行连续一阶累加处理[25]。其对这组数据利用最小二乘法求解灰色系数,利用灰色系数构建灰色微分方程,求解微分方程即可以得到拟合公式。其预测模型为[24]

$$\hat{x}^{(1)}(t+1)=\left(x^{(0)}(1)-\frac{\hat{b}}{\hat{a}}\right)\mathrm{e}^{-\hat{a}t}+\frac{\hat{b}}{\hat{a}},t=1,2,3,\cdots,n, \tag{4}$$

式中:$\hat{x}^{(1)}(t+1)$表示在时刻t+1的预测值;$x^{(0)}(1)$是初始值,表示在t=1时刻的实际值;$\hat{a}$和$\hat{b}$是模型参数,用于拟合灰色预测模型;$\mathrm{e}^{-\hat{a}t}$是指数项,用于捕捉系统的指数衰减趋势;$\hat{b}/\hat{a}$是系统的灰色作用量,表示系统的初始状态。

3　结果分析

3.1　土地利用情况的相互转移

为研究济宁市土地利用的转移情况,本文基于1980、2000和2020年的土地利用数据,利用土地利用转移矩阵进行地理空间数据可视化表达,通过计算得到1980—2000年和2000—2020年的土地利用转移矩阵,如表1、表2所示。

从整体上看,除未利用地外,主要的土地利用类型为耕地、草地、建设用地、水域,这些也是发生变化主要用地类型。在本文研究的2个阶段中,研究区域土地利用类型在1980—2000年变化程度不大,2000—2020年变化明显。1980—2000年,济宁市经济发展较为欠缺,人民生活水平相对较低。这一时期,人民的住房问题突显,表现为对居住等建设用地的需求增大。与此同时,济宁市的产业巨头煤矿业刚刚起步,工业用地也开始逐渐增加。其中21 a间,建设用地面积净增加最多,增加了154.99 km^2,占净增加总面积的35.11%,由于当地征收土地税,耕地净减少最多,净减少206.36 km^2,占净减少总面积的46.74%,耕地面积的净减少主要转为建筑用地、水域和草地,分别为151.92、26.62和20.75 km^2,耕地面积净增加主要来源于水域和建设用地。2000—2020年,随着经济迅速发展,人口不断增加,人民生活水平提高,对生活质量的要求变高,这期间煤矿业迅速增多,末期开始推进资源转型,主要体现在建设用地面积不断增加,耕地面积不断减少。建设用地净增加1 289.03 km^2,占净增加39.87%;建设用地净减少685.48 km^2,占净减少面积的21.20%;建设用地面积实际增加603.57 km^2;耕地面积净增加1 248.22 km^2,占净增加面积的38.60%,耕地面积净减少1 692.72 km^2,占净减少面积的52.35%,耕地面积实际减少444.50 km^2,净减耕地面积主要转化为建设用地、水域及草地,而净增耕地面积主要来自草地及水域。

3.2　耕地演变

3.2.1　耕地面积时空变化分析

为探究济宁市耕地演变情况,本文采用ArcGIS软件对1980、1990、2000、2010和2020年的土地利用数据进行分析,最终得到1980—2020年土地利用类型变化趋势(图2)。

在空间演变上,1980—2020年,济宁市耕地呈

表1　1980—2000年济宁市土地利用转移矩阵　单位:km^2

土地利用类型	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	总计	21 a净减少
草地	610.24	6.54	1.42	0	0	0	618.20	7.96
耕地	20.75	7 748.41	151.92	5.30	26.62	1.77	7 954.78	206.36
建筑用地	0.08	22.52	945.28	0	0.06	0	967.94	22.66
林地	1.00	0.55	0	210.58	0	0	212.13	1.55
水域	16.60	62.72	1.65	1.00	1 168.61	1.39	1 251.97	83.36
未利用地	0	4.25	0	0	115.33	39.41	158.99	119.58
总计	648.67	7 844.99	1 100.27	216.88	1 310.62	42.57	11 164.00	—
21 a净增加	38.43	96.58	154.99	6.30	142.01	3.16	—	441.47

注:—指无数据。

表2　2000—2020年济宁市土地利用转移矩阵　　单位:km^2

土地利用类型	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	总计	21 a净减少
草地	242.51	285.62	33.39	43.39	29.57	4.78	639.25	396.75
耕地	168.95	6 072.46	1 204.98	54.97	254.68	9.14	7 765.18	1 692.72
建筑用地	17.78	638.99	403.99	6.65	18.90	3.16	1 089.47	685.48
林地	42.92	81.92	9.76	63.37	8.93	4.00	210.90	147.53
水域	6.84	222.23	37.72	2.28	982.96	9.81	1 261.84	278.88
未利用地	4.85	19.46	3.18	2.50	2.10	9.51	41.60	32.09
总计	483.85	7 320.68	1 693.02	173.16	1 297.14	40.40	11 008.25	—
21 a净增加	241.34	1 248.22	1 289.03	109.79	314.18	30.89	—	3 233.45

注:各地类面积转移数据为遥感影像数据。

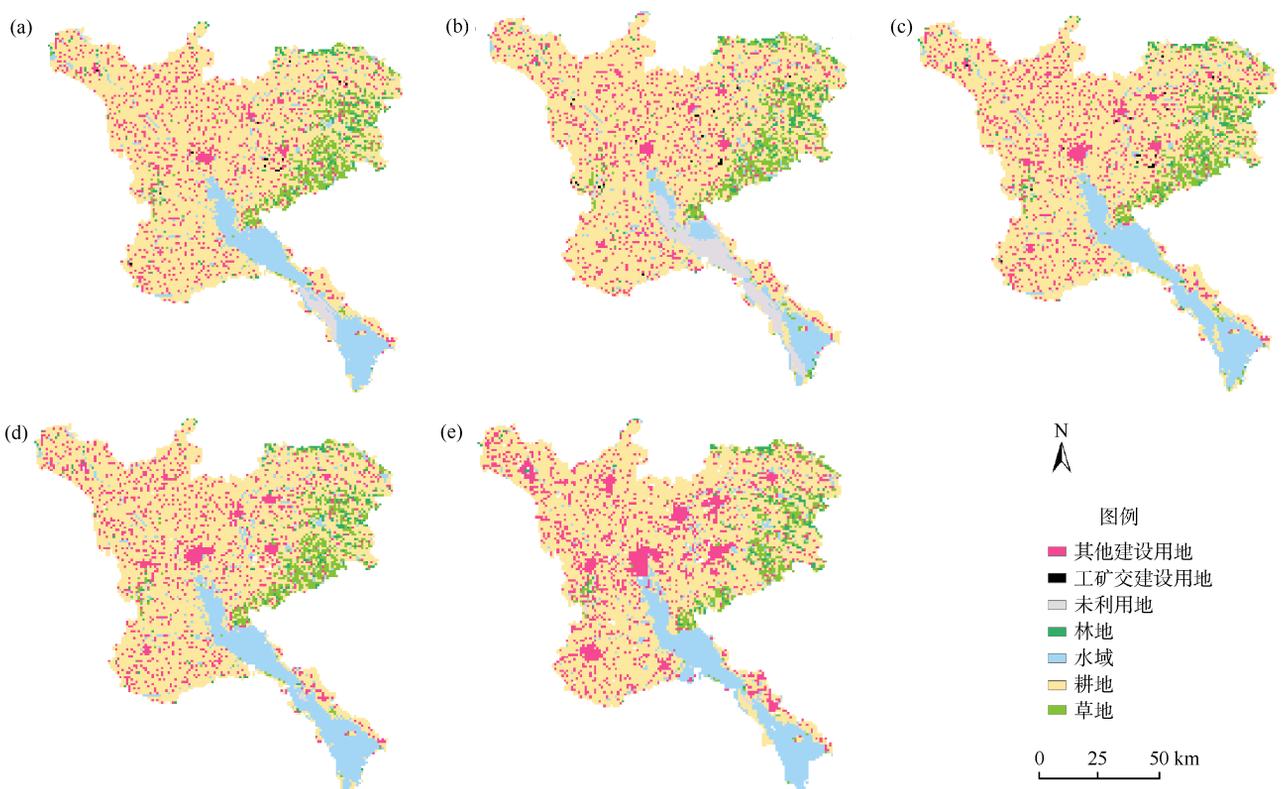


图2　1980—2020年济宁市土地利用类型变化

(a)1980年;(b)1990年;(c)2000年;(d)2010年;(e)2020年

现“西多东少”的现象,中部和东部减少较为显著。工矿交建设用地和其他建设用地2种建设用地由细小图斑逐渐转变为聚集型,部分图斑在原有基础上扩大,部分新增建设区,同时,草地呈现减少趋势。就工矿交建设用地而言,在1980—1990年,该土地类型新增了图斑,原有的图斑也不断扩大;在1990—2010年,随着煤矿业持续发展,新图斑不断增加;在2010—2020年,新增图斑变多,且不断扩大,但由于济宁市开始关闭部分煤矿,原有图斑也有消失现象。

在面积变化上,1980—2020年,耕地面积不断减少,共减少了654.42 km^2,工矿交建设用地明显增加,增加了52.38 km^2。具体而言,1990年,为济宁市煤矿的巅峰时期,诞生了全国八大煤矿之一的兖矿集团,煤矿业的发展不断占用耕地,耕地面积从1980年的5 731.81 km^2减少至1990年的5 519.25 km^2,减少了212.56 km^2,占总减少量的32.48%;1990—2010年间,耕地面积减少了217.65 km^2,占总减少量的32.48%;2006年,济宁市清查了一批违规违法占用的土地,开始注重耕地保护,该市煤矿也告别了“黄金十年”,2000—2010年耕地出现了缓慢增加的现象,增加了98.18 km^2;到了2016年,该市针对资源型城市的转型制定了详细的规划,煤矿业日趋渐下,关闭

了部分煤矿,并对煤矿导致的塌陷土地进行修复,但耕地依旧持续减少,从2010年的5 203.42 km^{2}减少至2020年的5 077.39 km^2,减少了126.03 km^2,占总减少量的19.26%。就水域而言,在1990年出现明显的减少现象。其显著变化与“黄河夺淮”有关,导致黄河水患频繁。在20世纪60—90年代初期间,黄河下游累计发生决口和改道11次,其中有7次发生在山东省境内;在此时间段内,南四湖水域面积不断减少(数据来自https://www.jschina.com.cn)。

3.2.2　耕地面积相对变化分析

为研究济宁市耕地面积的相对变化情况,本文以1980、1990、2000、2010和2020年的耕地面积数据进行分析,以济宁市各县市区耕地面积为研究对象,计算耕地面积的相对变化率,通过参考相关文献[26-28]并结合实际情况,将济宁市各县市区耕地面积的相对变化率R划分为4个等级区:如果$R\geq1$,表明各县市区耕地面积变化与济宁市变化方向一致,变化幅度大于全市平均水平,即$R\geq3$为耕地急剧减少区,$1<R<3$为耕地快速减少区;如果$0\leq R\leq1$表明各县市区耕地面积变化与济宁市变化方向一致,变化幅度小于全市平均水平,即耕地缓慢减少区;如果$R<0$,表明各县市区耕地面积变化与济宁市变化方向相反,即耕地增加区。通过ArcGIS可视化表达可以得到济宁市耕地面积相对变化情况(图3)。

在4个阶段中,其中2000—2010年耕地面积变化程度较小,其余3个阶段耕地面积都有较大程度的变化。1980—1990年国家在改革开放初期进行农地产权改革、大力发展经济,调动了农民生产积极性,对耕地需求量增加,后备耕地资源储备较为丰富,但该市煤矿发展势头正茂,仅有金乡县、汶上县和梁山县出现耕地面积增加的现象,其相对变化率分别为-5.09、-4.69、-2.10,而其他县市区的耕地面积普遍减少。鱼台县因大量挖掘矿产资源,对工矿建设用地需求量增加。泗水县山地丘陵较多,森林资源比较丰富,耕地面积较少。这2个区域的相对变化率分别为13.40、4.54,其耕地面积减少都较为迅速,为耕地急剧减少区;1990—2000年鱼台县、泗水县和邹城市出现了耕地增加的情况,相对变化率分别为-5.50、-1.02和-0.14,这与此阶段国家禁止乱占耕地,对占用耕地进行征税有一定关系。其中,微山县受微山湖及河流冲刷的影响出现了耕地流失现象,金乡县受经济发展的影响耕地减少迅速,

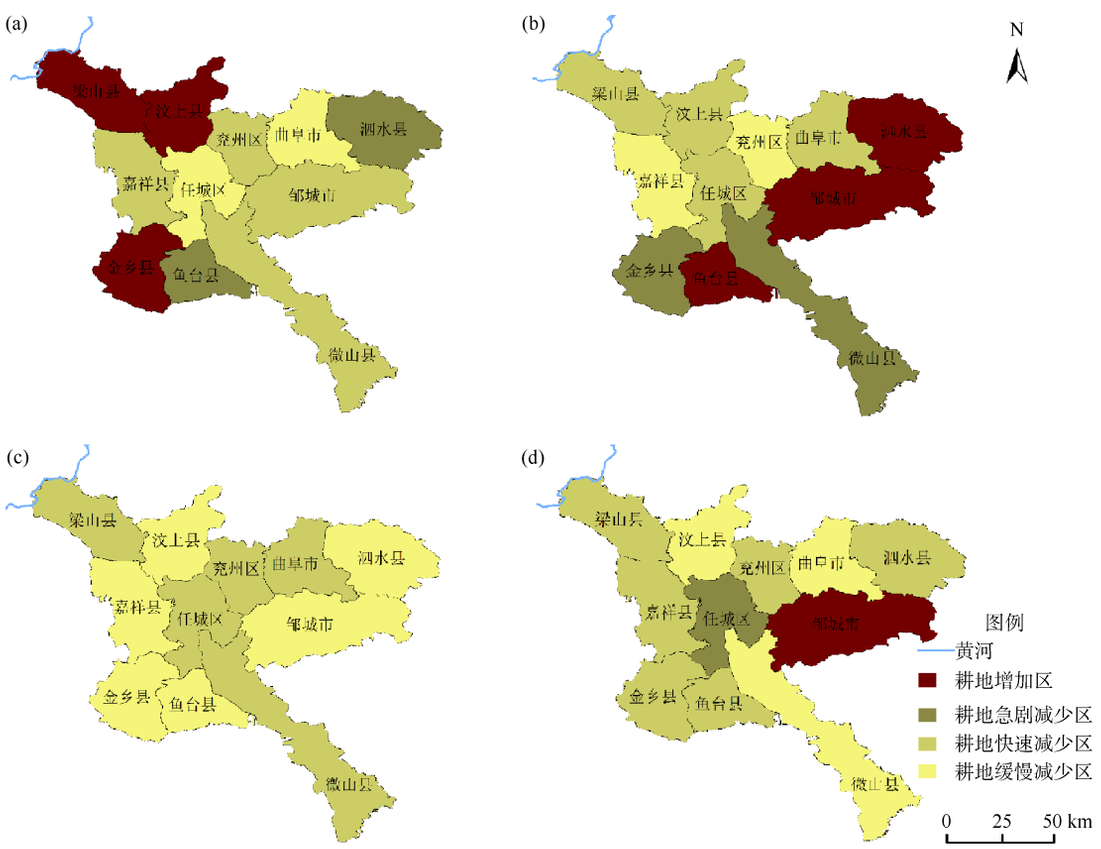


图3　1980—2020年济宁市县域耕地面积相对变化空间分布格局

(a)1980—1990年;(b)1990—2000年;(c)2000—2010年;(d)2010—2020年

耕地面积相对变化率分别为6.26、3.03,为耕地急剧减少区,其余几个县市区减少较为缓慢。2000—2010年,由于经济发展需要占用耕地,济宁市耕地面积均出现减少的情况。2010—2020年国家注重粮食安全,划定高标准基本农田,耕地面积出现了增加的情况,但该市整体减少趋势大于增加趋势,仅有邹城市耕地面积相对变化率<0,数值为-1.94,为耕地增加区。

3.2.3　耕地变化动态度分析

将县域用作分析耕地变化动态度的最小单位,并利用耕地变化动态度公式进行计算得到济宁市耕地动态变化情况(见图4)。将济宁市耕地变化动态度K分为3级:当K≤0.2时,表示耕地变化相对较为稳定,变化幅度较小,为1级;当0.2<K<0.5时,表示耕地变化在一定程度上存在波动,变化幅度较为中等,为2级;当K≥0.5时,表示耕地变化幅度较大,变化相对剧烈,为3级。

从空间角度上,济宁市耕地面积变化动态度在各县市区有一定的差异性;从时间角度上,各时期耕地面积变化动态度差异较为明显。耕地动态度的变化存在显著的南北差异性,主要是由南北部经济发展差异造成,济宁市北部工厂、矿区较多,经济发达,南部水域占地较多,耕地变化一定程度上受到限制。一般表现为人口密度越大,经济越发达的地区,耕地变化动态度越大。1980—1990年济宁市各县市区耕地变化动态较低,该市处于经济发展初期,煤矿业处于起步阶段,位于北部的几个县市区地势较为平坦,人口密度相对较小,引起耕地的波动程度较小;1990—2000与2000—2010年,耕地变化动态度相对较小,耕地动态变化差异程度开始向济宁市南部偏移,其偏移是由于济宁市南部水域较多引起的,该市耕地受湖泊河流影响出现耕地流失的情况,农业发展受到影响;2010—2020年,济宁市各县市区耕地动态变化度均较高,主要集中在济宁市中部,该市中部地势平坦,经济发展迅速,吸引部分人口流入,加之国家绿水青山以及建设高标准农田政策的实施,济宁市出现了耕地动态度变化较高的现象。

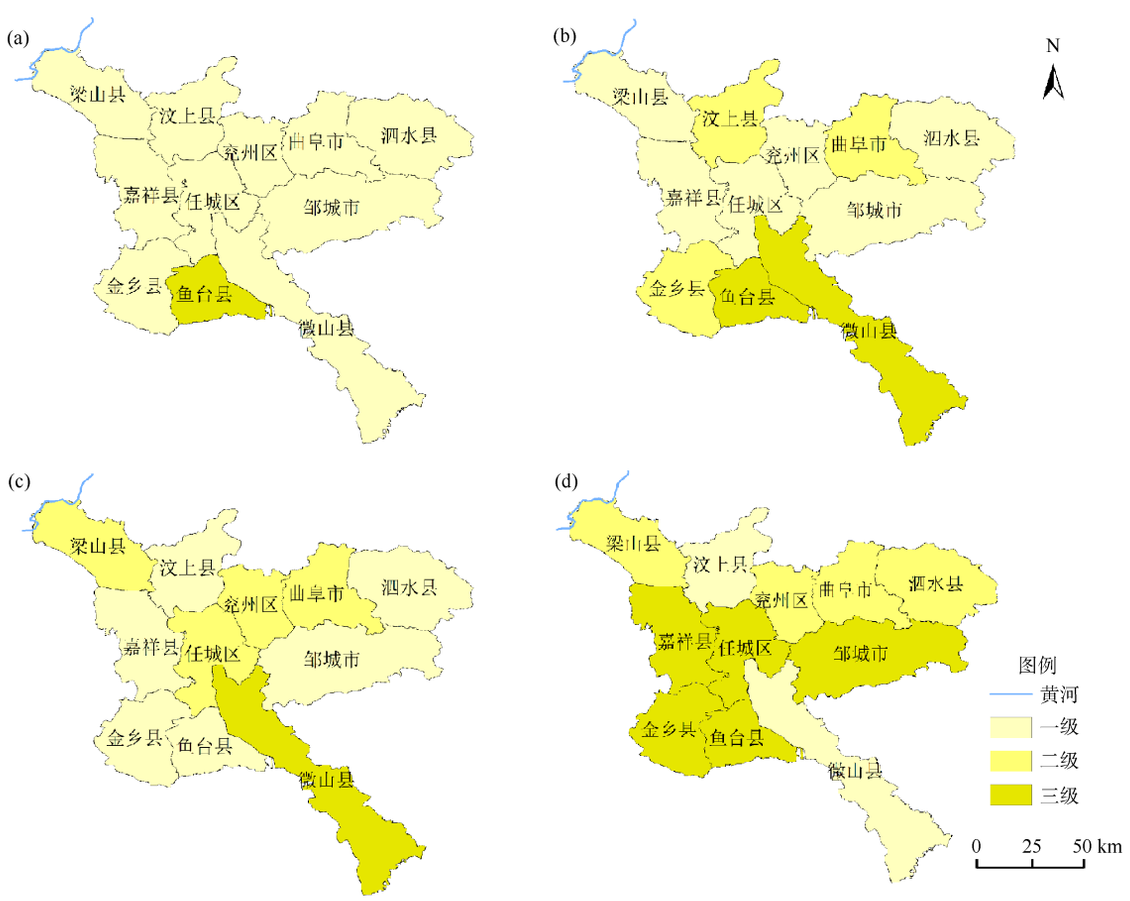


图4　1980—2020济宁市县域耕地动态度变化空间分布格局

(a)1980—1990年;(b)1990—2000年;(c)2000—2010年;(d)2010—2020年

3.3　济宁市耕地面积变化的驱动机制

3.3.1　耕地面积变化驱动因子选取

耕地面积变化经常受多种因素的影响,可以分为自然因素和社会经济因素。自然对土地的影响是渐进而缓慢的过程,除非受到极端自然灾害的影响,土地的变化通常需要数百年甚至数千年才能显著显现。在较短时间内经济、人口和技术等社会经济因素对耕地的影响起决定作用[29-30]。因此,本文在对济宁市耕地影响因素探究过程中,主要研究社会经济对耕地的影响。

参考诸多学者关于耕地影响因素的相关研究成果[31-33],综合考虑济宁市耕地的实际情况,从人口、经济和农业技术3个方面选取指标。其中,济宁市为山东省工业城市,煤矿业是其支柱产业之一,兖矿集团更是被列入世界500强企业,因此在经济因素驱动因子选取时,将重点放在工业和煤矿业方面。最终确定:人口因素为常住人口(x_1)、城市人均居住面积(x_2);经济因素为煤炭开采产值占国内生产总值比例(x_3)、第二产业产值占总行业产值比例(x_4)、工业产值占第二产业产值比例(x_5);农业技术因素为农业机械总动力(x_6)、农业生产总值占总行业产值比例(x_7)、第一产业产值占总行业产值比例(x_8)。

选取1996—2020年序列资料作为基础数据,以耕地面积为因变量(y),各种驱动因子为自变量(x),并使用SPSS软件对所选数据进行标准化处理。

3.3.2　耕地面积变化驱动力分析

本文主要采用特征值>1和累积贡献>85.00%来确定最终的主成分。济宁市的特征值和方差贡献率结果见表3。通过表中的结果显示,前3个主成分累计贡献率已经>85.00%,累计贡献率为90.57%。因此可以确定影响济宁市耕地面积的驱动因子,并提取3个主成分进行下一步的分析与探索。

主成分载荷为主成分和变量间的相关系数。

表3　济宁市主成分分析特征值和方差贡献率

主成分	特征值	方差/%	累积/%
1	4.06	50.73	50.73
2	2.04	25.48	76.21
3	1.15	14.37	90.57
4	0.34	4.29	94.86
5	0.28	3.51	98.37
6	0.09	1.11	99.48
7	0.03	0.33	99.81
8	0.02	0.19	100.00

为了从实际意义来解释3个主成分,通过分析表4中主成分载荷可以得到:主成分1中x_1、x_2、x_3、x_4的因子载荷量>0.80,其载荷矩阵比较大,即主成分一可以用这几个因子来反映,表明主成分1所包括的因子对济宁市耕地面积变化有重要影响,可概括为人口因素和经济因素;主成分2中x_5的因子载荷量达到0.91,其他因子载荷量都较低,可概括为经济因素;主成分3与x_8有较大的相关性,可概括为农业技术因素。由此,可将影响济宁市耕地面积变化的因素分为人口因素、经济因素、农业技术因素3部分。

关于济宁市各个驱动因子关联度的结果,见表4。各个驱动因子与耕地面积的关联度,其值越接近1,关联性越强。具体而言,经济因素中的x_4、x_5与耕地面积的关联性最强,关联度都达到0.97,表明经济因素中的煤炭开采占国内生产总值比例、第二产业产值占总产值比例为主要驱动因子,经济因素为主要驱动因素;农业技术因素中的x_6关联度达到了0.96,表明农业技术因素为重要驱动力;驱动因子x_1、x_7关联度都为0.93,表明常住人口、农业生产总值占总产值比例为耕地面积的重要驱动因子,人口因素与农业技术因素都为重要驱动因素。总体上,济宁市耕地面积的动态变化受工业和煤矿业影响显著。

本文运用主成分分析法对经济因素驱动因子的选择进行了更为细致的拆分,将其进一步细分为

表4　济宁市的主成分载荷和关联度

因素	驱动因子(代码)	主成分1	主成分2	主成分3	关联度
人口	常住人口(x_1)	0.96	0.07	0.01	0.93
	城市人均居住面积(x_2)	0.94	0.11	−0.12	0.92
经济	煤炭开采产值占国内生产总值比例(x_3)	0.83	0.45	0.24	0.78
	第二产业产值占国内生产总值比例(x_4)	−0.83	0.18	−0.24	0.97
	工业产值占第二产业产值比例(x_5)	−0.31	0.91	0.22	0.97
农业技术	农业机械总动力(x_6)	−0.66	0.68	0.28	0.96
	农业生产总值占国内生产总值比例(x_7)	−0.56	−0.64	0.26	0.93
	第一产业产值占国内生产总值比例(x_8)	0.11	−0.30	0.91	0.80

煤炭开采占国内生产总值比例、第二产业产值占总产值比例、工业产值占第二产业产值比例。研究结果强调了煤炭开采和第二产业产值所占比值对耕地变化的显著影响,工业和煤矿业的发展是主要驱动因素,尤其突显了煤矿业在济宁市经济中的重要地位。与乔庆伟等[34]研究结果的差异在于对经济因素的驱动因子选择上,其研究中虽然考虑了工业化因素,但所选取的工业化因子较为有限。本文在经济因素的选择上特别关注了与济宁市工业和煤矿发展密切相关的多个因子。这种精细化的分析能够更全面、深入地了解耕地变化的驱动机制,为未来的相关研究提供了更为具体和实用的方法。

4　耕地面积变化预测

耕地面积变化的影响因素会对未来土地利用情况产生持续影响。通过预测未来15年的耕地面积,有助于深入了解过去的影响因素是否依然具有显著影响力,或者是否出现了新的影响因素。

采用灰度系统GM(1,1),对济宁市2020—2035年间耕地面积的变动进行预测,以确定未来15年耕地面积的发展趋势,济宁市1996—2020年实际耕地面积与预测耕地面积的走势曲线(图5)。根据预测模型显示,$\left(x^{(0)}(1)-\hat{b}/\hat{a}\right)$的值为-26 686.92,$\hat{a}$的值为0.002,$\hat{b}/\hat{a}$的值为26 740.65。其相对平均误差为0.226%,模型的最大相对误差为0.100<0.2,即模型拟合效果良好,符合要求。研究期内,实际耕地面积与预测值都呈现持续减少趋势,2条曲线发展趋势一致。结合上述2个信息,说明模型的拟合优度符合要求。1980—2020年,该市耕地面积呈现减少态势,共减少了2 960 km^2;2020—2035年耕地面积也呈现减少的态势,由1996年的5 370 km^{2}减少到2025年的5 340 km^2,最终降低至2035年的4 330 km^2。据预测结果显示,该市耕地资源流失迅速,耕地保护情况迫在眉睫。

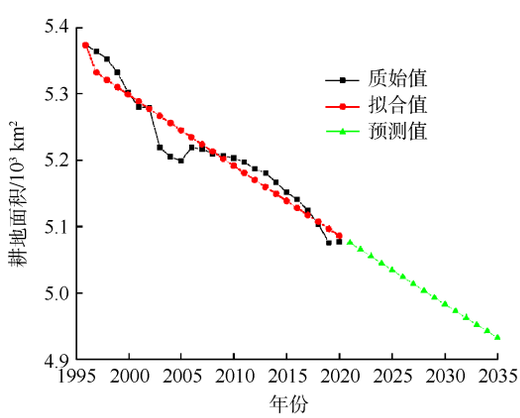


图5　模型预测

5　结　论

本文以济宁市1980—2020年土地利用数据以及1996—2020年耕地面积、各驱动因子统计数据为依据,利用ArcGIS软件进行数据可视化处理,分析研究黄河流域下游典型的煤矿区济宁市的耕地时空演变特征;利用SPSS降维的方法对各个驱动因子进行分析以探究影响耕地的因素,采用灰色系统模型对耕地面积预测,得到主要结论如下:

(1)在耕地演变的时间维度方面,位于黄河流域下游煤矿区的济宁市在经济发展的影响下,耕地整体呈减少趋势,建设用地中的工矿交建设用地不断增加,减少的耕地主要转为建设用地、草地和水域。济宁市应限制煤矿区域的扩张,推动煤矿区复垦和生态修复,以维护农地的可持续利用。

(2)在耕地演变的空间维度方面,济宁市受东高西低地形的影响,耕地在空间上呈现“西少东多”的典型特征。近10年来,该市中部和西部地区成为耕地减少的主要区域,且工矿交用地新增了建设用地,原有的图斑也不断扩大。该区域经济较为发达、工业化水平较高,且受黄河流域下游水域的影响,同时该市中西部煤矿开采较为频繁,导致地面塌陷严重。在多重因素的综合影响下,耕地流失严重。济宁市应强化土地保护政策,加强水域生态修复,控制煤矿开采对地表的影响,以实现可持续的耕地利用和地面稳定。

(3)在耕地驱动因素方面,耕地面积的变化是各种因素综合作用的结果,工业和煤矿的发展是主要驱动因素。煤炭开采占国内生产总值比例和第二产业产值占总产值比例等因子主要驱动着耕地面积发生变化。针对以上情况,建议明确煤炭开采区域,强化环保措施,以最小化对耕地的负面影响,同时推动产业结构升级,促进可持续经济发展。

参 考 文 献

[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.

[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.

[3] TIWARY R K. Environmental impact of coal mining on water regime and its management [J]. Water, Air, and

Soil Pollution,2001,132(1):185-199.
[4] 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.
[5] 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, 2000,104(52):20672-20677.
[6] TESHOME M. Populaion growth and culivated land in rural Ethiopia: land use dyamics, aces, fam size, and fragmentaiony [J]. Resources and Environment, 2014, 4(3):14.
[7] 廖美玉,方秀琴,蒋心远,等.黄河流域近40年土地利用/覆被时空变化特征[J].水土保持学报,2024,38(2):165-177+189.
[8] 孙博,吴雨珂,闫白冰,等.1990—2020年淮河生态经济带耕地资源分布变化特征与驱动机制[J].农业工程学报,2023,39(23):247-258.
[9] 原晋涛,陈万旭,曾杰.中国耕地利用变化时空分异特征及对耕地NPP的影响[J].自然资源学报,2023,38(12):3135-3149.
[10] 陈景平,胡振琪,袁冬竹,等.凤台县煤粮复合区耕地演变预测及影响[J].矿业科学学报,2018,3(5):425-433.
[11] 石秀伟,胡振琪,侯占东,等.小尺度煤粮复合区耕地演变预测[J].金属矿山,2013,42(1):134-137.
[12] 张瑞娅,肖武,张建勇,等.基于转移矩阵的矿区土地利用结构变化分析:以淮南某高潜水位煤矿为例[J].贵州农业科学,2014,42(7):206-209.
[13] ZHAO G X, LIN G, WARNER T. Using thematic mapper data for change detection and sustainable use of cultivated land: a case study in the Yellow River delta, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004,25(13):2509-2522.
[14] 卫新东,宋林韩,王筛妮,等.黄河西岸陕西各县市耕地质量时空变化特征及其分异规律[J].水土保持研究,2021,28(2):326-334.
[15] 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.
[16] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等.黄河河口镇—潼关区间1998—2010年土地利用变化特征[J].地理学报,2014,69(1):42-53.
[17] 郭振华,杨武年,杨鑫,等.洛阳市近十年土地利用遥感动态监测及驱动力分析[J].测绘,2012,35(2):62-65+77.
[18] 李艳忠,刘昌明,刘小莽,等.植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J].自然资源学报,2016,31(12):2005-2020.
[19] 张冉,王义民,畅建霞,等.基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应[J].自然资源学报,2019,34(2):274-287.
[20] 全斌.土地利用与土地要被变化概论[M].北京:中国科学技术出版社,2010.
[21] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999(1):83-89.
[22] 文广超,赵梅娟,谢洪波,等.伊犁河谷西部土地植被覆盖演化及驱动力分析[J].干旱区研究,2021,38(3):843-854.
[23] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:中国统计出版社,2000.
[24] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2004.
[25] 邓聚龙.灰色预测与决策[M].武汉:华中科技大学出版社,1986.
[26] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003(5):643-650.
[27] 赵育恒,谭永忠.中国第二次土地调查以来省域耕地利用时空变化[J].水土保持通报,2020,40(1):204-212.
[28] 袁承程,张定祥,刘黎明,等.近10年中国耕地变化的区域特征及演变态势[J].农业工程学报,2021,37(1):267-278.
[29] 张茂茂,张雪松,何炬,等.基于村域尺度的鄂北地区耕地时空变化特征分析:以湖北省随县厉山镇为例[J].中国农业大学学报,2019,24(9):179-189.
[30] 陈雨秋,尹峰,于婧.湖北省耕地数量的时空变化及驱动力分析[J].湖北大学学报(自然科学版),2021,43(1):102-109.
[31] 邓楚雄,李晓青,向云波,等.长株潭城市群地区耕地数量时空变化及其驱动力分析[J].经济地理,2013,33(6):142-147.
[32] 程宪波,杨子生.云南省昭通市土地利用时空变化特征及其驱动力[J].水土保持通报,2018,38(2):166-170+177.
[33] 王全喜,孙鹏举,刘学录,等.基于随机森林算法的耕地面积预测及影响因素重要性分析:以甘肃省庆阳市为例[J].水土保持通报,2018,38(5):341-346.
[34] 乔庆伟,许庆福,王增如,等.济宁市耕地动态变化及驱动因素分析[J].山东国土资源,2006(增刊1):119-122.

(责任编辑:李拓宇)