



农业资源与环境学报

Journal of Agricultural Resources and Environment

ISSN 2095-6819, CN 12-1437/S

《农业资源与环境学报》网络首发论文

题目：黄土高原沟道农地转换特征及影响机制初探
作者：璩路路
DOI：10.13254/j.jare.2021.0335
收稿日期：2021-05-27
网络首发日期：2021-09-16
引用格式：璩路路. 黄土高原沟道农地转换特征及影响机制初探. 农业资源与环境学报.
<https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0335>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

黄土高原沟道农地转换特征及影响机制初探

璩路路

(重庆大学公共管理学院, 重庆 400044)

摘要:生态建设和土地整治工程驱动黄土高原沟道土地利用及农业生产发生较大变化,为探讨其农地转换特征及影响机制,以延安市地处黄土高原丘陵沟壑区的8个区县为研究区,选取2000-2018年间4期24幅Landsat TM/OLI数据,采用CART决策树分类方法提取出研究区的沟道农地分布并分析其空间变化,构建时空地理加权回归模型,挖掘延安市沟道人地系统特征,探究其空间要素沟道农地的时空转换及其影响机制。结果表明:(1)近20年间延安市沟道农地呈现出发散式分布和阶段性扩展,总体波动式收缩趋势,重心整体向北迁移;(2)加入时间序列坐标的时空地理加权回归在沟道农地转换研究中具有较强的适用性,社会经济因素是近20年间延安市沟道农地转换的主要驱动力,且呈现逐年上升态势;(3)延安市沟道农地转换的不同驱动因子系数时空分布各异,人口因子和坡度因子的作用强度始终处于主导地位,地均GDP因子高值分布区在北部和中西部地区形成“核心边缘”的漏斗状格局,其变化趋向于核心“流动”。黄土高原沟道农地发展变化受多种因素驱动,地区本底差异及不同的行为主体促使沟道农地发展变化趋于不同方向,但原则上均受国家及区域重大发展政策导向的影响。

关键词:沟道农地识别;影响机制;时空地理加权回归;人地系统科学;延安地区

doi : 10.13254/j.jare.2021.0335

Temporal and spatial characteristics and driving mechanism of gullies farmland conversion on the Loess Plateau

QU Lulu

(School of Public Policy and Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This study explores agricultural land transformation and how its impact mechanism can provide scientific reference for the evolution of human land relationships and the development of multiple functions of gully agriculture in the Loess Plateau. In this study, Yan'an City of the Loess hilly and gully region, which has a rapid development of gully agriculture, is used as the research area, 30 Landsat TM / OLI data in four periods of 2000–2005, 2005–2010, and 2010–2018 were selected, and the distribution range of gully farmland in the research area was extracted by CART decision tree classification method; its spatial change was analyzed to construct the coupling time

收稿日期: 2021-05-27

作者简介: 璩路路 (1991-), 男, 河南孟州人, 博士, 讲师, 主要研究方向为土地利用与城乡发展。

E-mail: qululu91@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504701); 中央高校基本科研业务费 (2021CDJSKJC02); 国家自然科学基金项目 (41801172, 42071227)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFC0504701); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2021CDJSKJC02); The National Natural Science Foundation of China (41801172, 42071227)

non-stationarity and spatial heterogeneity. A geographically and temporally weighted regression model was used to explore the characteristics of the gully coupled human-environment system in Yan'an City and to explore the driving force of the gully farmland expansion and its spatial-temporal differentiation pattern. Results show that: 1) During the past 20 years, the gully farmland in Yan'an City has been distributed and expanded in stages, with an overall fluctuating contraction trend, and the gravity center has moved northward as a whole; 2) The geographically and temporally weighted regression model coupled with time non-stationary and spatial heterogeneity has a better fitting effect, verifying its applicability in the study of spatiotemporal transformation driving force of farmland expansion. Social and economic factors are the main driving forces for the expansion and transformation of gully farmland in Yan'an City in the past 20 years, increasing yearly; 3) The spatial-temporal distribution of the different driving factors of the gully farmland expansion transformation in Yan'an City has different influences; the intensity of the population factor and the slope factor is always in the dominant position, as the main driving factor of the gully farmland expansion transformation. The high-value distribution area of the land average GDP factor forms a funnel-shaped "core edge" pattern in the north and the central and western regions, and its changes tend to "flow" to the core. In the Loess Plateau, the development and change of gully farmland are driven by many factors, and the regional background differences and different actors will promote the development and contraction of gully farmland in different directions; however, in principle, they are driven by the major national and regional development policies

Keywords: gully farmland identification; driving mechanism; geographically and temporally weighted regression; human-earth system science; Yan'an City

黄土高原是中国集农牧过渡区、生态脆弱区、经济贫困区为一体的特殊区域，也是生态保护与经济矛盾的体现区、精准脱贫与乡村振兴衔接的重点区，生态保护、人地系统协调与可持续发展始终是黄土高原高质量发展的基本命题^[1,2]。其中，黄土丘陵沟壑区梁峁起伏、沟壑纵横，独特的地理区域特征塑造了极具特色的乡村人地系统^[3]。在经济社会发展及城镇化进程中，黄土丘陵沟壑区同时遭受了来自自然生态与人类活动的双重扰动^[4]，随着国家退耕还林还草工程和治沟造地工程的深入实施，区域植被明显改善，人-粮-地矛盾逐步缓解，黄土高原丘陵沟壑区乡村人地系统转型发展趋势明显^[3-4]。

改革开放以来，黄土高原丘陵沟壑区乡村人地系统运行特征可概括为三个演变阶段：坡地农业阶段、坡面植被建设阶段和沟道农业发展阶段，其过程经历了农业生产的广种薄收到生产实践的可持续节约化，总体呈现向现代农业的转型趋势。目前针对黄土高原丘陵沟壑区乡村人地系统的相关研究主要集中在新型经营主体、生态治理以及产业化等视角，重点研究乡村人地系统核心要素（聚落和土地利用）的空间形态^[5-6]、典型模式^[7-9]、演化过程^[10]、动力因素和机制^[11-13]等。新时期黄土丘陵沟壑区乡村优质耕地不足，沟谷低地的建设用地发展空间受限，沟道区域生态恢复与乡村萧条并存，沟道乡村发展缓慢及乡村五化更加凸显^[6]，黄土丘陵沟壑区乡村人地系统发展亟待重构。随着计量地理学及人地系统科学的不断发展，人地系统演变过程研究不断更新和深入，更加强调系统要素间互馈与关联，而系统动力分析以及 GWR、ESDA、Geo-detector 等模型方法得到学界重视^[14-16]，逐渐将空间因素嵌入系统模型中，揭示系统要素影响驱动机制。

以沟道农地为核心的沟道人地系统演变兼具时间和空间属性，时间和空间地理位置的变化均会引起变量间关系或结构的变化^[17]，而时间的非平稳性（滞后效应）需要纳入模型的

范围，同时将空间和时间维度纳入驱动力分析模型中，对于更加全面、科学地探究沟道农地转换驱动力的时空变化特征及规律具有重要意义。黄土高原农耕区沟道乡村人地系统是一个因沟道自然、经济、环境等空间变化而存在差异的一个系统，其侧重点更多依附于沟道农地单元的农业生产^[1,18]，在此背景之下，本研究关注以沟道农地为核心的乡村人地系统的演变过程，其关键点聚焦于剖析系统人与地的时空变化关系，并整合到一个框架中探究农地变化根源与时空影响机制，探索“医治”途径，开准药方对症下药，以巩固退耕还林和治沟造地成效，进而助力乡村振兴和区域可持续发展。

鉴于此，本文拟选取 2000-2005 年、2005-2010 年、2010-2018 年间 3 段时期 24 幅 Landsat TM/OLI 数据，应用 CART 决策树分类算法进行遥感影像解译，获取相应时间序列的沟道农地变化信息，实现沟道农地的识别，同时耦合空间和时间因子，构建时空地理加权回归模型，实现沟道农地时空演变的驱动力分析，剖析沟道农地转换驱动影响机制，以期能为沟道农业可持续发展和流域乡村振兴提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

延安市黄土高原丘陵沟壑腹地位于黄土高原的中心地带，总面积约 18729 km²，是黄河流域中上游与北方农牧交错区的结合地带，涵盖延安市中北部的宝塔区、延长县、甘泉县、安塞县、延川县、子长县、志丹县和吴起县八个区县（图 1）。研究区地形条件复杂，沟、涧、坡、梁、峁交错，地貌类型十分典型。1999 年以来，作为退耕还林工程和治沟造地工程的首批试点地区，该区域率先实现地表颜色由“黄”变“绿”、生产空间由“坡地”到“沟道”的转变^[19,20]。在城乡融合与黄河流域高质量发展背景下，以延安市黄土丘陵沟壑区为案例区，开展沟道型农地转换特征及机制研究具有典型性和代表性^[21]。

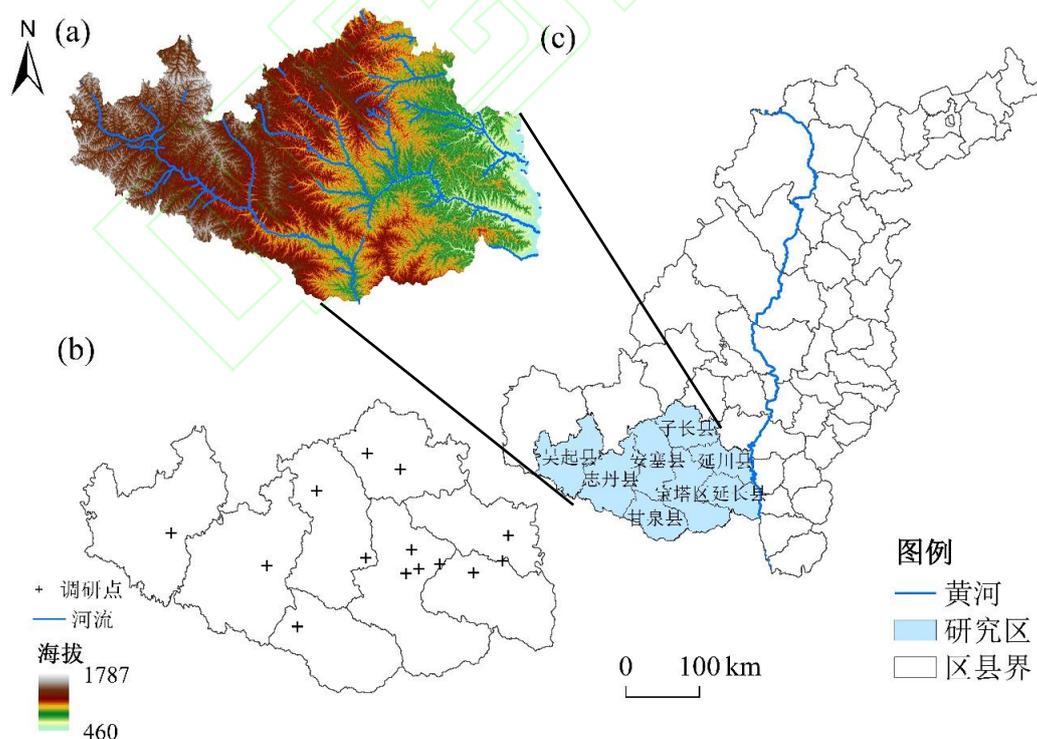


Figure 1 General situation of the study area and investigation sites

1.2 数据来源

本研究所用数据主要分为遥感数据和社会经济数据两大类,社会经济数据主要通过野外实地调研、田野访谈以及统计年鉴整理获取。遥感数据来源于美国地质调查局(USGS)(<http://glovis.usgs.gov/>),选取2000-2018年空间分辨率为30m的Landsat影像数据,作为提取沟道农地的基础数据,2000-2018共选取24幅影像。土地利用类型解译参照中科院资源环境信息数据库关于土地利用覆被的分类方法。理论上4-10月份作物植被生长茂盛,影像分类精度、辨识容易度和准确度要高于其它月份,且基准期影像云量都小于2%。同时,使用30m分辨率的DEM数字高程数据(<http://www.gscloud.cn/>)用于辅助土地利用的分类;以Google Earth影像和部分典型流域高分辨率土地分类数据作为训练样本和验证样本的基础数据。此外,选用的各等级矢量路网数据来自Open-Street-Map网站提供的开放地理空间数据,社会经济数据来源于延安市统计年鉴及实际调研,基于ArcGIS 10.4对社会经济数据进行空间化。

2 研究方法

2.1 沟道农地识别

2.1.1 CART 决策树算法

在遥感影像的分类中,人工智能神经网络(AINN)、决策树(DT)、支持向量机(SVM)等分类方法应用较为普遍^[22]。其中,决策树分类法通过借助遥感影像的辅助信息,可有效挖掘影像光谱特征,能在较大程度上解决遥感影像的物谱重叠问题。DT决策树分类法常用的算法有:C4.5、CART、ID3等^[23],而CART算法采用经济学中用于均衡分配收益的基尼系数(式1)作为最佳测试变量确定的准则,与其它决策树相比,CART决策树的模型简单,由训练样本定分类阈值,自动建立决策树,较少受到其它因素影响,识别精度较高^[23]。

$$\text{Gini}(D)=1-\sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (1)$$

式中:D为数据集,n为数据集的分类数, p_i 为数据集D中隶属于i类的分布概率。

2.1.2 沟道农地识别

沟道农地也可称之为“川道耕地”“坝地”,是一种新的农业生产形态^[4]。沟道农地识别规则为:首先,提取基期年2018年的农地范围,作为沟道农地本底数据,然后基于基期本底农地范围的变化倒推其他年份像元(T),基于以上判定获取研究特定年限(1995-2018年)的疑似沟道农地范围。在疑似判定的基础上,再进行最终范围的确定,方法是以基期年(t)前一年份(t-1)的沟道农地的范围为基础,二次提取t-2年疑似沟道农地和t-1年疑似沟道农地的重合部分,此部分判定隶属于t-2年的沟道农地范围,按此方法依次迭代,得到规定年限时间连续序列的沟道农地范围。

2.2 影响因子选取及模型构建

2.2.1 影响因子选择

为深入探究影响沟道农地转换的驱动因素,参照相关文献^[24-25],结合研究区实际以及数

据的可获取性，分别从社会经济、区位、自然和邻域四个方面选取驱动因子（表 1）：①社会经济类，包括人口密度、地均 GDP；②区位类，包括距区县行政中心、距乡镇行政中心；③自然地理类，包括坡度、坡向、地形起伏度；④邻域特征类，包括距国道、距高速公路、距省道、距县道、距铁路、距水域的距离等。社会经济指标是指城镇化过程中沟道农业发展随着时间变化的驱动因素，其中财政收入、国内生产总值等经济收入指标能反映区域的经济实力，道路等基础设施反映经济投入和社会发展；以往相关研究中，人口变化数据通常被归入社会经济因素进行分析，考虑到沟道丘陵山区区位条件的特殊性，加之黄土高原退耕还林工程、社区安置工程等的特殊性，使研究区的人口与经济分布在地域空间上的“流”关系处于不断变化之中，故把人口相关数据与经济社会其它因素区分，将其归纳为人文因素，最终确定城镇化率、人口密度、一产从业占比、人均财政收入和一产变率等 5 项指标。

自然环境指标是指影响农作物生长的水土、光照等自然因素和坡度、高程等环境条件，水土资源是农业生产的基础，温度与光照是农业生产的保证，坡度、高程等自然环境也是限制农业生产发展的条件。最终，研究选择了区域水资源丰度、年平均气温、坡度、高程等 6 项指标。

区位条件既包括地理空间意义上的区位，即通常意义上的交通区位，也包括政策辐射等促进经济发展的经济区位。由于受自身立地条件和交通的限制，丘陵山区的区位往往使得其人口和经济不断处于变化之中，进而决定了其“人口流、经济流、信息流”的空间指向。交通区位是指享受交通运输的便利程度，也是沟通沟道流域农业乡村与城镇的重要桥梁，地理区位选取到各等级类型公路的距离和到主要河流的距离等 5 项指标表征。政策等辐射的难易程度等经济区位是农业乡村发展的重要引擎，选取到县域行政中心和乡镇行政中心的距离来表征。

表 1 影响因子选取

Table 1 Selection of driving factor indicators

目标层	分维度	时间维驱动因素	目标层	分维度	空间维驱动因素
Objects	Dimension	Temporal	Objects	Dimension	Spatial
社会经济	经济社会	主要公路密度(X ₁)	自然资源	发展区 (立地条件)	坡度 (X ₁₁)
		地均 GDP (X ₂)			高程(X ₁₂)
	人文因素	一产从业占比 (X ₃)	区位	空间场 (地理区位)	地形起伏度(X ₁₃)
		城镇化率(X ₄)			距最近国道距离(X ₁₄)
		人口密度 (X ₅)			距最近高速路距离(X ₁₅)
	人均财政收入 (X ₆)	到最近省道距离(X ₁₆)			
	一产结构变率 (X ₇)	距最近县道距离(X ₁₇)			
自然环境	自然资源	年降水量(X ₈)	驱动极 (经济区位)	距最近水域距离(X ₁₈)	
		年平均气温(X ₉)		距县行政中心距离(X ₁₉)	
		年总日照实数(X ₁₀)		距乡镇中心距离(X ₂₀)	

2.2.2 模型构建

(1) 多元逻辑回归模型

Logistic 模型具有处理离散变量的优势, 不仅可以对二分类或多分类的类别离散变量建立回归模型, 而且可以实现空间变量的定量化处理, 揭示解释变量对事件发生的影响强度, 弥补了传统线性回归无法对离散型变量进行回归分析的不足^[25-26]。本文探讨沟道农地是否收缩的两种类型变化, 故采用二元逻辑回归模型, 结合随机变量的期望值定义, 引入逻辑函数变换表达式:

$$\logit(p) = \log(p/1-p) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

(2) 时空地理加权回归模型

作为地理加权回归的时空拓展模型^[17], 其核心是将时间因子引入到空间地理加权回归模型中, 模型分析中引入时间维度, 加入了时间坐标, 通过叠加时间和空间坐标计算其时空权重矩阵, 赋予变量时空信息, 从而更加有效的估计因子参数, 其数学表达式为:

$$Y_i = \beta_0(X_i^t, Y_i^t, T_i) + \sum_m \beta_m(X_i^t, Y_i^t, T_i) X_{im} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中: Y_i 为样点 i 的观测值; (X_i^t, Y_i^t, T_i) 为样点 i 的地理时空坐标; $\beta_0(X_i^t, Y_i^t, T_i)$ 为样点 i 的回归常数项; $\beta_m(X_i^t, Y_i^t, T_i)$ 为样点 i 的第 m 个回归参数值; X_{im} 为独立变量 X_m 在样点 i 的值; ε_i 为误差项。

3 结果与分析

3.1 沟道农地空间转换格局特征

3.1.1 沟道农地收缩指数特征

以识别出的黄土高原丘陵沟壑区延安市沟道农地为对象研究其时序变化, 将延安市各时期的沟道农地数据与延安市区县行政边界叠置分析, 获取各区县的沟道农地收缩面积, 并计算沟道农地收缩速率, 结果如图 2 所示。

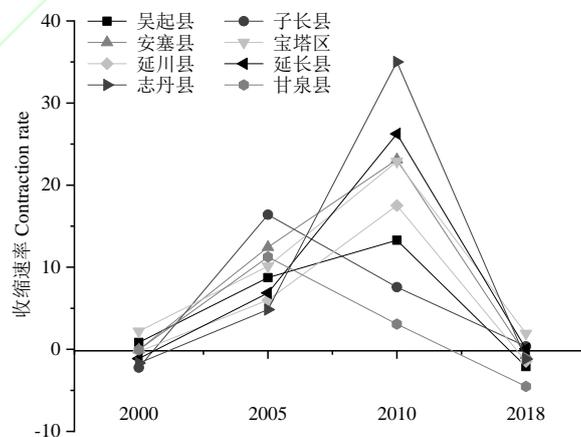


图 2 2000-2018 年研究区各区县四个时期沟道农地收缩速率

Figure 2 Shrinkage rate of gully farmland in four periods of Yan'an City from 2000 to 2018

根据图 2 可以看出,延安市各区县沟道农地收缩速率在 2000-2005 年,沟道整体农地收缩值为正,2005-2010 年,部分地区收缩速率继续增加,而 2010 年之后,农地收缩速率有所减缓,并在局部区县出现负值。总体上,延安市各区县沟道农地收缩速率先增加后减少,呈现出阶段性扩展,总体波动式收缩趋势。

3.1.2 沟道农地重心的迁移特征

近 20 年间,沟道农地重心呈现发散分布态势即向四周迁移的趋势,沟道农地重心整体向北迁移。其中吴起、宝塔、安塞等区县迁移方向一致性较高,宝塔区沟道农地迁移方向始终向北,而吴起县和安塞县向东南方向迁移;甘泉等区县沟道农地的空间转换强度较为剧烈,2005 年以前迁移方向保持不变,2005 年以后逐渐向反方向拓展,其他区县的沟道农地的阶段变化方向呈发散态势,整体特征较不显著(图 3)。

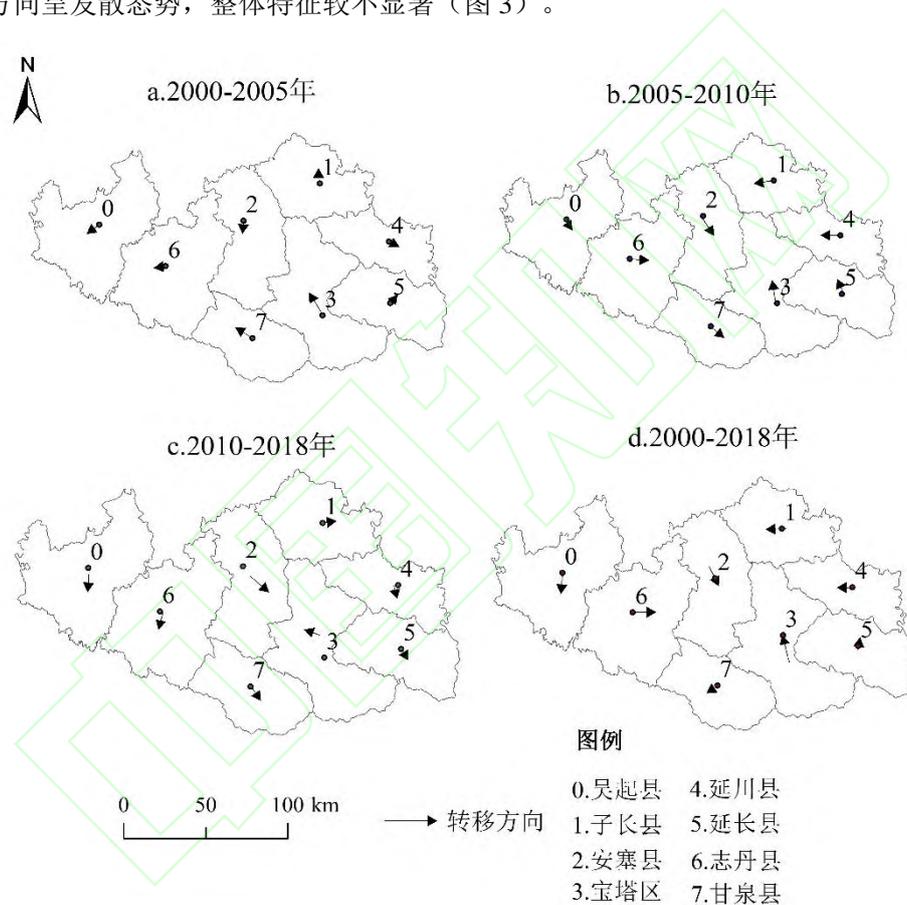


图 3 研究区各区县农地重心坐标迁移方向

Figure 3 Transfer direction of cultivated land gravity center in districts and counties of Yan'an

3.2 沟道农地转换驱动力分析

参照相关文献^[27-28],在 ArcGIS10.4 软件中对研究区各时段的沟道农地变化区采取随机分层抽样,共选取 4861 个样点,其中各类型区的数量大体相等,保证解释变量的系数在模型中的稳定性。研究阶段内样本数据点经时空地理加权回归模型处理(表 2),全部通过显著性检验($P < 0.05$)(表 2)。为验证 GTWR 的适用性,对全部样点采用线性回归 OLS 模型运算,由表 3 可知,GTWR 模型的 R^2 值高于 OLS 模型,而 AIC 信息准则指数低于 OLS 模型。AIC 是模型拟合优良的一个重要指标,该值越小则精度越高。由于 GTWR 模型加入了

时间维度的信息，即在处理时空非平稳性比传统模型的拟合优度更高。

表 2 时空地理加权模型诊断统计

Table 2 Statistics of overall parameters of geographically and temporally weighted regression

驱动因子	最小值	四分之一分位数	中位数	四分之三分位数	最大值
Driving factors	Minimum	Quartile	Median	Three quarters	Maximum
截距 Intercept	-0.3919	-0.0565	0.0257	0.1320	0.6239
T6	-1.3399	0.0229	0.1001	0.2295	0.5488
T5	-2.2942	-0.4253	-0.1709	0.0469	0.8249
T7	-3.8430	-0.1501	0.1863	0.4926	1.7699
T3	-6.6169	-0.6932	-0.2322	0.4463	1.5808
T4	-5.1133	-0.4521	-0.0995	0.2985	1.5287
T11	-8.7846	-0.3760	-0.1529	0.0356	0.8274
T13	-1.0248	-0.2259	0.0695	0.3779	3.8356
T10	-1.7000	-0.4558	0.3068	0.9633	1.0030
T1	-2.6693	-2.3905	-1.0851	-0.2395	1.2369
T8	-6.1140	-2.3399	-0.3992	0.5243	0.7178
T9	-4.1616	-0.3849	0.2826	0.9404	2.8666
T2	-1.4554	2.7472	4.6608	8.6157	5.8123

表 3 模型诊断结果对比

Table 3 Comparison of model diagnosis results

模型	相关系数	赤池信息准则	R ²	F 值 (r ²)	P 值 (r ²)
Models	coefficient	AIC	R ²	F value (r ²)	P value (r ²)
GTWR	0.525	11.3803	0.226	5.546	<0.001
OLS regression	0.377	11.5464	0.140	56.311	<0.001

3.2.1 沟道农地转换影响因素分析

基于相关学者的研究文献^[29]，结合区域层面统计资料的可获取情况，根据相关研究经验与黄土高原丘陵沟壑区发展的实际情况，本文进一步从自然、社会经济、人文三方面，时间、空间两个维度，力求从“分维度、多尺度”全面完整选取对沟道农业发展产生影响的因素。其中，时间因素包括经济、社会指标，空间因素包括自然环境、区位指标，政策为定性因素。空间因素主要选择了立地条件、地理区位、经济区位等8项指标，构成了极一场一区（驱动极、空间场、发展区）的空间驱动因素集。

为排除多因子的共线性影响，本文首先对驱动因子集进行了相关性分析，判断结果表明所选因子出现显著相关性，为此进一步对驱动因子集进行主成分分析，求得各成分的载荷矩阵与系数矩阵。进一步通过回归分析得到每个样本的综合得分值，借助ArcGIS软件对研究对象的属性字段赋值，至此完成GTWR的数据预处理。驱动变量主导因子如表4。

表 4 主成分驱动变量主导因子

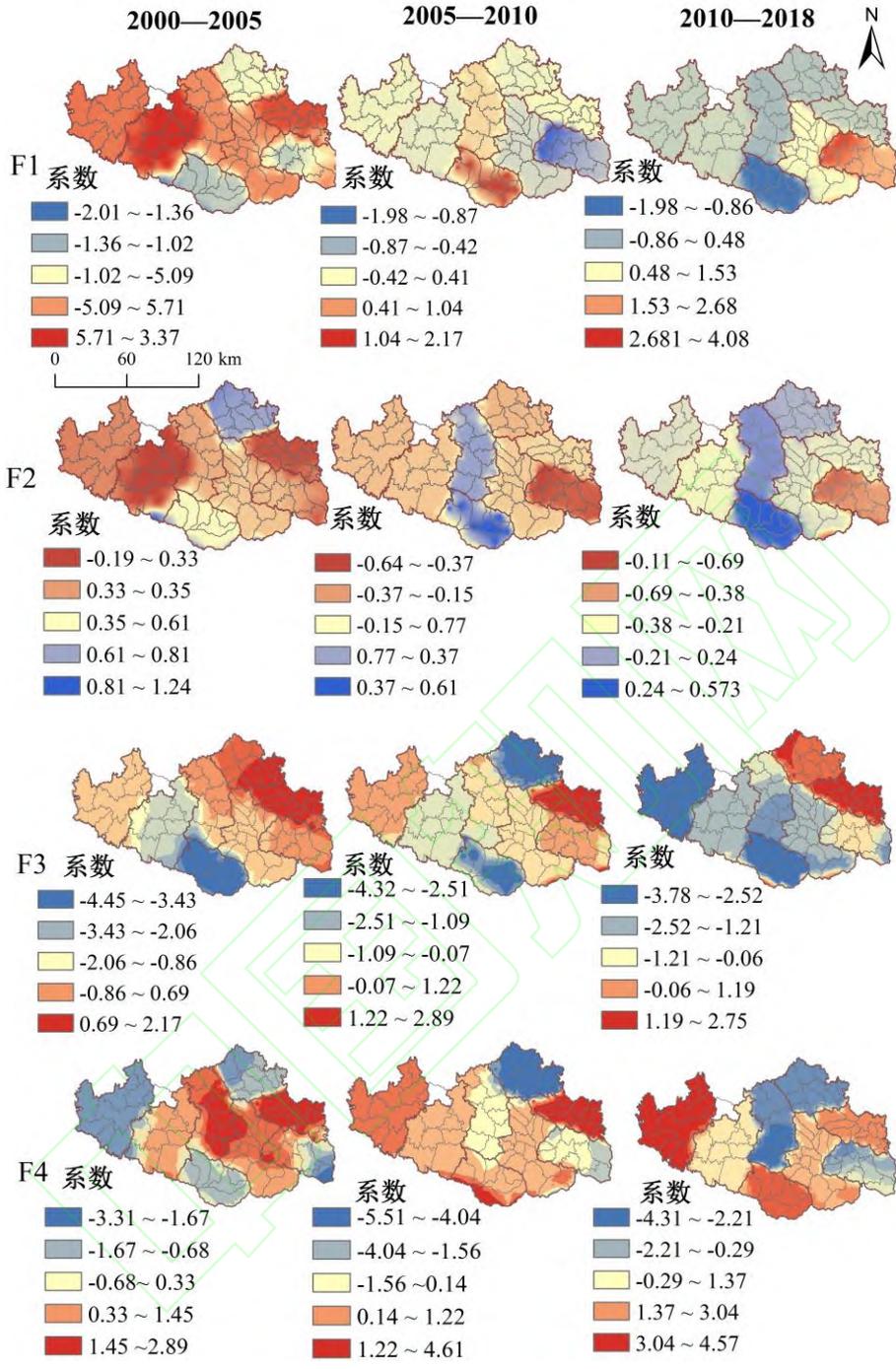
Table 4 Dominant factors of principal component driving variables

分类	主成分	主成分构成	主导方向	驱动类型
Classification	Principal component	Constitute	Predominating	Drive types
连续性	F ₁	X ₂ 、X ₃ 、X ₄	社会经济发展主导	多因素
	F ₂	X ₆ 、X ₂	投资发展主导	双因素
	F ₃	X ₂₀ 、X ₁₇ 、X ₁	区位主导	多因素
	F ₄	X ₁₄ 、X ₁₆	道路交通主导	双因素
阶段性	F ₅	X ₂ 、X ₄ 、X ₁₉	经济主导	多因素
	F ₆	X ₁₁ 、X ₁₃	地形坡度主导	双因素
	F ₇	X ₁₄ 、X ₁₅	道路交通主导	双因素
	F ₈	X ₅	人口密度主导	单因素

准确把握黄土高原沟道耕作转换的空间分异特征及其影响因素,可为后期沟道耕作转换的优化调控提供指导,为黄土高原农业高质量发展提供参考。黄土丘陵沟壑区自然生态环境禀赋相对较差,耕作易受道路通达度、地形起伏等因素影响,并呈现出不同的演变方向,通过对研究区部分影响因素的分析发现,沟道耕作转换与距河流、道路以及乡镇聚居点的距离大小为负相关性,即距离越远,沟道耕作转换面积占比就越少,在距河流距离 1.2 千米以内,沟道耕作转换面积随距离增加而急剧减少;在距道路 1.2 公里以外,其转型变换便趋于平缓,但在个别耕作类型上呈现不规则拐点,这与研究区近年来大规模的治沟造地工程驱动沟道耕地功能转型现象相关;在距乡镇聚居点 3-7 千米范围内,沟道耕作转换变化趋势基本一致,集聚效应更加显著。

3.2.2 沟道农地转换影响因子时空分异规律

根据图 4 可知,二十年间研究区 F1 (社会经济发展主导) 高值区,先由西向东部转移,其次由南向北扩展,驱动差异缩小,并逐步趋于均衡,最终形成绕宝塔区周边的集聚分布态势。2000-2005 年正向高值带贯穿于延长-安塞-吴起三个区县,而在子长及宝塔的中心区域、子长和延川则为负向高值并向志丹转移, F1 正负作用强度西北和东南差异明显; 2005-2010 年间正向高值主要分布在甘泉和安塞一带,驱动因子值域间差异缩小趋于均衡; 2010-2018 年格局演变逐渐形成以宝塔区为核心的甘泉、安塞正向高值和延长-宜川负向高值的环状圈层。从经济因子演化来看,宝塔区经济发展对农地扩展的外溢效应较高。F3 (区位主导) 因子的差异较大,从影响效应来看,乡镇的正向影响效应更强。人口和经济是所有因素中变化范围最显著的两大因子。人口也是沟道农地转换的直接推动力,经济发展则是核心驱动力,区位特征直接影响人口流、资金流,促进农地的转换,此外,退耕还林还草、沟道土地整治等相关政策、工程措施加快了农地转换的速度,进而促进沟道农业的空间转型。



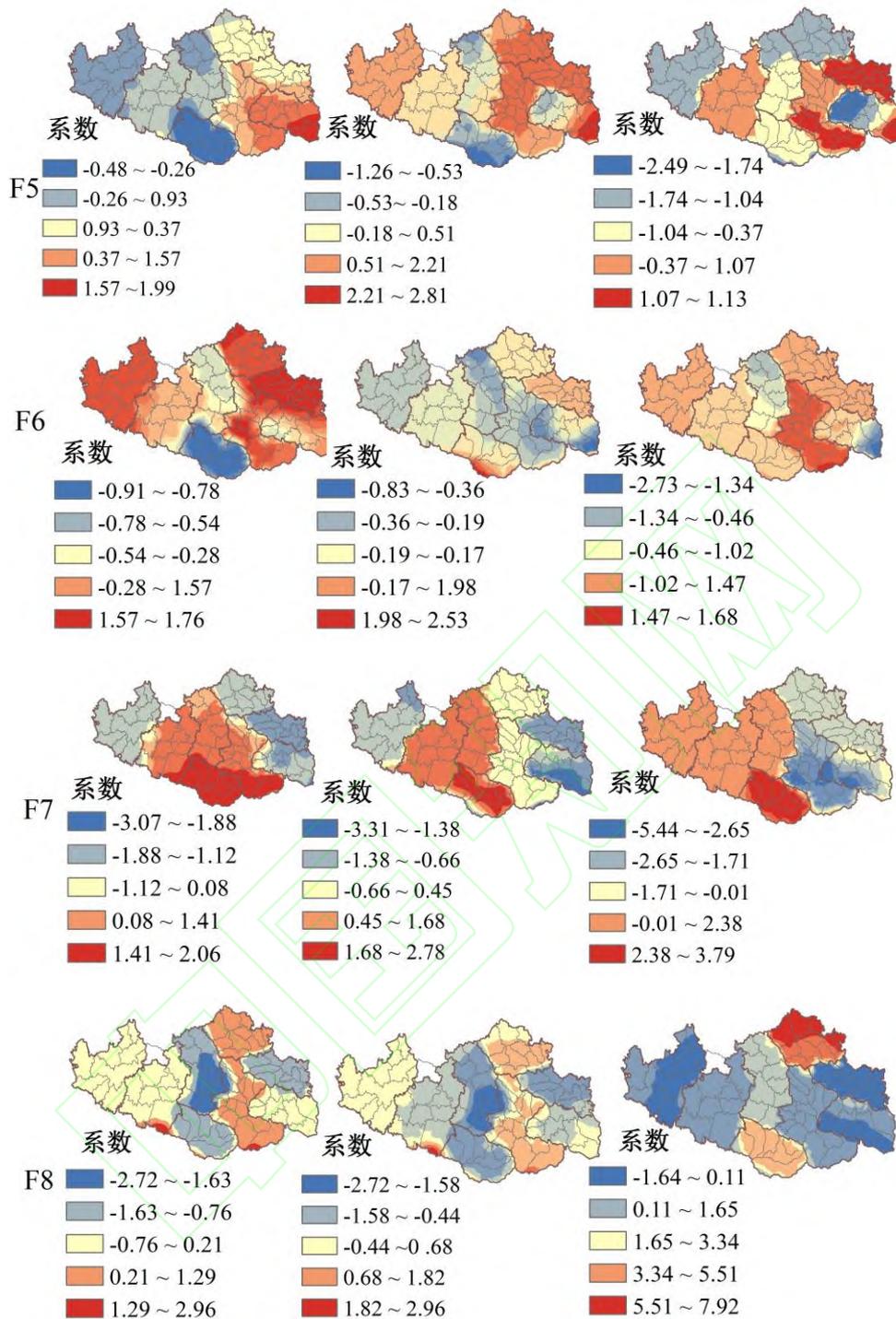


图 4 沟道农地扩展主导因子系数时空分异格局图

Figure 4 Spatio-temporal variation pattern of dominant factor coefficient of gully farmland expansion

根据图 4, F3 和 F5 变化较为相似, 2000-2018 年间, 时序上, 自然因子对沟道农地转换无显著变化, 空间上整体南北变化明显, 主要是因为研究区南北部地形地貌差异所致。根据 F4 (交通区位主导), 距国道 (X_{14}) 和高速距离 (X_{16}) 的影响强度分布呈现两个显著特征, 其一, 区域层面上逐渐形成南高北低, 并随时间变化高值区由延安市西南部逐步向北向东转移; 其二, 局部高值区在县界边境地区零星分布, 如延长西南部靠近宝塔区边境, 延川

的西北边境、宝塔区的西南部分地区以及安塞和志丹的交界边境地区。

F4 距离省道距离 (X_{19}) 因子影响强度总体呈现中部高四周低的演变态势。2000-2005 年纵向拓展至宝塔区呈“W”型高值区布局；2005-2018 年则进一步向北拓展至安塞县，且对宝塔区的农地拓展正向作用进一步增强；而 F8 (人口密度主导) 2000-2005 年主要分布在中部宝塔区和子长县，2005-2018 年高值区范围有所缩小，在区域内呈现点布分散式格局。

从沟道农地转换的驱动力变化范围来看，各驱动因子增长最大的为地均 GDP 经济因子，从驱动力区域变化格局来看，各地形因子对沟道农地扩展影响各异，这与沟壑区的地貌分异特征关系密切，经济发展对沟道农地的影响呈现“核心边缘”的漏斗状分布，其变化更加趋于向核心“流动”。延安市道路邻域因子影响各具特点，与路网的空间分布紧密相关，作用力变化显著区域集中于延安市中部地区，横跨东西方向，并汇焦于宝塔区，与延西高速、青兰高速和黄延高速线路重合，大致形成“T”字型分布样式。

3.2.3 核心影响因素驱动作用机制

对研究区 2000-2005 年、2005-2010 年、2010-2018 年三个阶段的因子系数分别统计均值，得到各阶段因子平均系数见下图 5。

(1) 全域核心因子判定：2000-2018 年来研究区沟道农地转换主要以社会经济因素的人口、地均 GDP，自然因素的坡度以及邻域因素的距水域的距离为核心影响因子。其中人口因子和坡度因子的作用强度始终处于主导地位，是沟道农地转换的主要驱动因素。人口作用强度在 2010-2018 年高于坡度，在 2000-2005 和 2005-2010 年之间，坡度对沟道农地转换的驱动优势更为明显。

(2) 全域核心因子时序演变：坡度作为研究区沟道农地转换影响最大的因子，其作用强度在研究初期至 2010 年为波动升高的变化态势，且到 2010 年强度最大；人口与沟道农地收缩变换关系在前 10 年呈负相关，人口对于沟道农地扩展变换，总体作用强度呈下降趋势；坡向和地形起伏因子与沟道农地收缩成正相关，从整个研究期来看，坡向作用强度先减后增总体持平，交通邻域因子影响普遍呈略微降低态势，且沟道对农地转换呈负相关，因子强度波动降低。距县城中心距离与沟道农地收缩成负相关，作用强度先减少后增加，总体上呈增加趋势；距水域和乡镇中心距离与延安市沟道农地收缩变换呈正相关关系，且这些因子作用强度逐渐呈下降趋势。

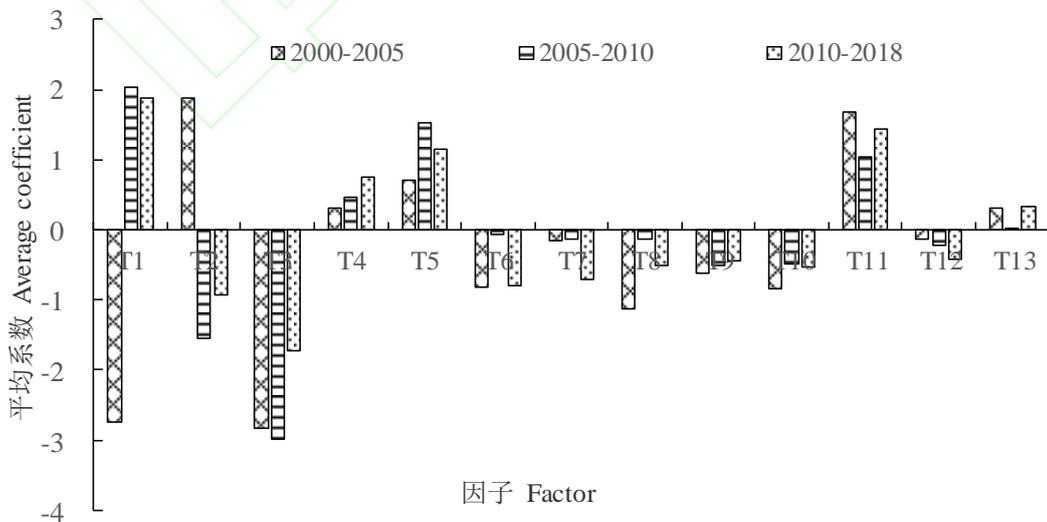


图 5 各时段因子平均系数变化时序分布

Figure 5 Time series distribution of factor average coefficient change in each period

在县域尺度上准确判别沟道农地转换驱动力是沟道地域土地差异化治理的基础。为便于识别县域间沟道农地转换驱动的差异及判定驱动强度时序变化,将驱动农地转换的因子发生率(正相关变量直接取对数 $\exp(g)$, 负相关变量通过 $1/\exp(g)$ 因子转换成正向累积值)分别在各县域间比对。

20年间沟道农地转换的核心驱动因素均是人口、地形起伏度、坡度、坡向和地均GDP, 延长和志丹的首位驱动因子均是人口, 宝塔区的地均GDP在2000年以前是首要驱动因子, 2000以后人口成为首要驱动因子, 甘泉、安塞等区县则呈现出明显的阶段性特征。区域空间分布上, 人口和经济驱动力较强的区县多在延安的东中部集中, 而坡度、坡向、地形起伏度等驱动力较强的区县则多在西部, 形成区县层面上东西部区域空间上的显著差异, 而从影响沟道农地转换的自然因素的主导因子坡度的影响时序来看, 除甘泉的其余各区县坡度对沟道农地转换的驱动力仍未下降, 说明自然本底条件的限制作用依然较强。

4 讨论

(1) 针对数据和技术方法方面, 本实验所选遥感影像数据时间为4-10月份, 作物与草地相差较大易于区分, 并通过影像分类的精度来间接验证沟道耕地的识别精度。另外时空地理加权回归模型实现了时空角度的综合测度, 较为精细的刻画了驱动因子的时空演变特征及主导驱动机制, 但如何基于地物空间位置信息以提高影像分类精度及进一步优化黄土丘陵沟壑区乡村地域人地系统圈-带-区多级空间结构体系仍需深入探究。

(2) 针对研究结果, 本文分析了不同类型的沟道农地空间变化特征, 获取了沟道农地转换的社会经济、区位、地形等因素的定量结果及影响过程, 但政策作为一种非量化的影响因素, 在沟道农地转换中是必不可少的且是非常关键的。另外, 随着沟道土地整治工程的推进, 沟道农地的数量也在发生变化, 同时农民的意愿、产权制度改革等也是进一步需考虑的因素。后续通过选取典型类型区, 从微观尺度探究不同地域类型变化的过程与机制, 进而揭示沟道农地为基础的乡村人地系统科学原理及乡村地域“人地圈”机理^[30-33]。

(3) 针对沟道农地利用的政策启示, 黄土丘陵沟壑区沟道农地转换现象揭示了生态建设和沟道土地整治工程驱动下的流域乡村人地系统演变的一般规律, 即以生态安全和粮食安全为目标, 生态经济“双赢”为方向, 现代地理工程为技术手段, 最终实现质量效益和发展效能的高质量发展^[1]。黄土丘陵沟壑区沟道农地转换一定程度上促使退耕还林、治沟造地等政策相互融合, 在保护农民生计改善的前提下, 对于促进沟道地域三生结合(生产、生活、生态)、三产融合, 进而促进黄土高原高质量发展具有启示意义。

5 结论

本文以延安市黄土丘陵沟壑区作为典型案例区, 按照人地系统科学理论, 遵循“沟道农地识别—转换格局描绘—影响因素剖析”的逻辑轴线, 对沟道农地转换特征及其影响机制进行了初步探索。主要结论如下:

(1) 近20年间延安市沟道农地呈现出发散式分布和阶段性扩展, 总体波动式收缩趋势, 重心整体向北迁移; 沟道农地作为沟道农业的重要土地类型, 与沟道地域人类行为关系密切, 沟道农地的这一转换趋势, 可为沟道聚落的转型调控方向提供指导。

(2) 社会经济因素是近20年间延安市沟道农地转换的主要驱动力, 且呈现逐年上升态势; 坡度、地形起伏度及坡向的影响效应逐步减弱; 道路交通及区位因子影响程度呈略微升高态势。2000年以来人口等社会经济因子的作用强度逐步增加, 人口因子作用强度在宝塔、延长和甘泉呈逐渐上升趋势, 经济因子作用强度在甘泉、安塞、子长和吴起逐年上升。总体而言, 延安市沟道农地转换是自然环境、经济发展、沟道整治等多重因素综合作用的结果,

在发展过程中应注重生态-经济的双重导向,最大限度的实现沟道农地的可持续利用,探求沟道农地与人居环境的协调优化,实现居业协同。

(3) 延安市沟道农地转换的不同驱动因子系数时空分布影响各异,人口与坡度因子的作用强度始终处于主导地位,地均GDP高值分布区在北部和中西部地区形成“核心边缘”的漏斗状格局,其变化趋向于核心“流动”,黄土高原沟道农地发展变换受多种因素驱动,地区本底差异及不同的行为主体会促使沟道农地发展收缩变化趋于不同方向,但原则上均受国家及区域重大发展政策导向驱动影响。

参考文献(References)

- [1] 刘彦随,冯巍仑,李裕瑞. 现代农业地理工程与农业高质量发展——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 地理学报, 2020, 75(10): 2029-2046.
LIU Y S, FENG W L, LI Y R. Modern agricultural geographical engineering and agricultural high-quality development: Case study of loess hilly and gully region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2029-2046.
- [2] LIU Y S, LI J T, YANG Y Y. Strategic adjustment of land use policy under the economic transformation[J]. *Land Use Policy*, 2018, 74(5): 5-14.
- [3] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 637-650.
LIU Yan-sui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 637-650.
- [4] LI Y R, LI Y, FAN P C, et al. Impacts of land consolidation on rural human-environment system in typical watershed of the Loess Plateau and implications for rural development policy [J]. *Land Use Policy*, 2019, 86: 339-350.
- [5] LI Y R, ZHANG X C, CAO Z, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 756, 143676.
- [6] LIU Y S, LI Y H. Revitalize the world's countryside [J]. *Nature*, 2017, 548(7667): 275-277.
- [7] 姜凯斯,刘正佳,李裕瑞,等. 黄土丘陵沟壑区典型村域土地利用变化及对区域乡村转型发展的启示[J]. 地理科学进展, 2019, 38(9): 1305-1315.
JIANG K S, LIU Z J, LI Y R, et al. Land use change of typical villages in the loess hilly and gully region and implications for regional rural transformation and development [J]. *Progress in Geography*, 2019, 38 (9): 1305-1315.
- [8] LIU X Q, LIU Y S, LIU Z J, et al. Impacts of climatic warming on cropping system borders of China and potential adaptation strategies for regional agriculture development [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 755, 142415.
- [9] 张轩畅,刘彦随,李裕瑞,等.黄土丘陵沟壑区乡村生态产业化机理及其典型模式[J].资源科学,2020,42(7):1275-1284.
ZHANG X C, LIU Y S, LI Y R, et al. Mechanism and typical patterns of rural ecological industrialization in the Loess Hilly Gully region of China [J]. *Resources Science*, 2020, 42(7): 1275-1284.
- [10] Cao Z, Li Y R, Liu Y S, et al. When and where did the Loess Plateau turn “green”? Analysis of the tendency and breakpoints of the normalized difference vegetation index [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(1): 162-175.
- [11] HE M N, WANG Y Q, TONG Y P, et al. Evaluation of the environmental effects of intensive land consolidation: A field-based case study of the Chinese Loess Plateau [J]. *Land Use Policy*, 2020, 94, 104523.
- [12] WU W H, CHEN Z F, LI Y H, et al. Land engineering and its role for sustainable agriculture in the agropastoral ecotone: A case study of Yulin, Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Geographical Science*, 2019, 29(5): 818-830.
- [13] JIN Z, GUO L, WANG Y Q, et al. Valley reshaping and damming induce water table rise and soil salinization on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2019, 339, 115-125.
- [14] 王琪,王永生,杜国明,等.基于人地关系的干旱区耕地流转空间分异特征与驱动机制的地理探测[J].农业资源与环境学报, 2021, 38(2):241-248.

- WANG Q, WANG Y S, DU G M, et al. Geographical exploration of spatial differentiation characteristics and driving mechanism of cultivated land circulation in arid regions based on human-land relationships[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 241-248.
- [15] 陈宗峰,李裕瑞,刘彦随.黄土丘陵沟壑区乡村聚落分布格局特征与类型[J].农业工程学报,2017,33(14):266-274+316.
CHEN Z F, LI Y R, LIU Y S. Distribution pattern characteristic and type classification of rural settlements in loess hilly-gully region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (14): 266-274 + 316
- [16] 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
- [17] MA X L, ZHANG J Y, DING C, et al. A geographically and temporally weighted regression model to explore the spatiotemporal influence of built environment on transit ridership[J]. *Computers, Environment and Urban*, 2018 (70) ,113-124.
- [18] 王永生,李玉恒,刘彦随.现代农业双优工程试验原理与方法——以毛乌素沙地为例[J].中国工程科学,2019,21(2):48-54.
WANG Y S, LI Y H, LIU Y S. Principle and method of modern agricultural two dimension optimization engineering experiment – a case study of Mu Us sandy land [J]. *Chinese Engineering Science*, 2019, 21(2): 48-54
- [19] CAO Z, LIU Y S, LI Y R. Rural transition in the loess hilly and gully region: From the perspective of “flowing” cropland [J]. *Journal of Rural Studies*, 2019.04.003.
- [20] WANG J Y, LIU Y J, LI Y R. Ecological restoration under rural restructuring: A case study of Yan'an in China's loess plateau [J]. *Land Use Policy*. 2019 (70) : 104087.
- [21] 刘彦随,陈宗峰,李裕瑞,等.黄土丘陵沟壑区饲料油菜种植试验及其产业化前景——以延安治沟造地典型项目区为例[J].自然资源学报, 2017,32(12):2065-2074.
LIU Y S, CHEN Z F, LI Y R, et al. The planting technology and industrial development prospects of forage rape in the loess hilly area: A case study of newly-increased cultivated land through gully land consolidation in Yan'an, Shaanxi province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 69-78.
- [22] 陈云,戴锦芳,李俊杰.基于影像多种特征的 CART 决策树分类方法及其应用[J].地理与地理信息科学,2008,24(2):33-36.
CHEN Y, DAI J F, LI J J. CART-based decision tree classifier using multi-feature of image and its application [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2008, 24 (2): 33-36.
- [23] 赵萍,傅云飞,郑刘根,等.基于分类回归树分析的遥感影像土地利用/覆被分类研究[J].遥感学报,2005,9(6):708-716.
ZHAO P, FU Y F, ZHENG L G, et al. Cart based Land use / cover Classification of remote sensing images [J].*Journal of Remote Sensing*, 2005, 9 (6): 708-716.
- [24] XIAO G F, ZHU X F, HOU C Y, et al. Extraction and analysis of Abandoned Farmland: a case study of Qingyun county and Wudi County in Shandong Province [J]. *Journal of Geographic Sciences*, 2019, 29 (4): 581-597.
- [25] 刘彦随,杨忍.中国环渤海地区城乡发展转型格局测度[J].地理学报,2015,70(2):248-256.
LIU Y S, YANG R. The spatial pattern measure of urban-rural development transformation in the Bohai Rim region in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70 (2): 248-256.
- [26] 璩路路,刘彦随,周扬,等.罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应——以井冈山为例[J].生态学报,2019,39(10):3468-3481.
QU L L, LIU Y S, ZHOU Y, et al. Spatio-temporal evolution of ecologically-sustainable land use in the Luoxiao mountains and responses of its ecosystem services: A case study of Jinggangshan City in Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39 (10): 3468-3481
- [27] 刘彦随,周扬.中国美丽乡村建设的挑战与对策[J].农业资源与环境学报,2015,32(2):97-105.
LIU Y S, ZHOU Y. Challenges and countermeasures for beautiful countryside construction in China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(2):97-105.
- [28] 杨忍.基于自然主控因子和道路可达性的广东省乡村聚落空间分布特征及影响因素[J].地理学报,2017,72(10):1859-1871.
YANG R. An analysis of rural settlement patterns and their effect mechanisms based on road traffic accessibility of Guangdong [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (10): 1859-1871.

- [29] 史洋洋,吕晓,郭贵成,等.基于GIS和空间计量的耕地利用转型时空格局及其驱动机制研究[J].中国土地科学,2019,33(11):51-60.
SHI Y Y, LV X, GUO G C, et al. Temporal-spatio pattern and driving mechanism of cultivated land use transformation based on GIS and spatial econometric model [J]. *China Land Science*, 2019, 33 (11): 51-60.
- [30] 刘彦随. 新时代乡村振兴地理学研究[J]. 地理研究, 2019, 38(3): 461-466.
LIU Y S. Research on the geography of rural revitalization in the new era [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(3): 461-466.
- [31] 刘彦随,周扬,李玉恒.中国乡村地域系统与乡村振兴战略[J]. 地理学报,2019,74(12):2511-2528.
LIU Y S, ZHOU Y, LI Y H. Rural regional system and rural revitalization strategy in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2511-2528.
- [32] 刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案[J]. 地理学报, 2018, 73(2): 203-218.
LIU Y S, ZHANG Z W, WANG J Y. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 203-218.
- [33] 刘彦随.现代人地关系与人地系统科学[J].地理科学,2020,40(8):1221-1234.
LIU Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221-1234.