

引用格式: 璩路路, 李裕瑞, 董世杰, 等. 黄土高原沟道耕作转型时空特征及启示: 以延安黄土丘陵沟壑区为例[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 955-967. [Qu L L, Li Y R, Dong S J, et al. Spatiotemporal characteristics of gully farming transformation on the Loess Plateau and implications: A case study of the Yan'an Loess Hilly and Gully Region[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 955-967.] DOI: 10.18402/resci.2022.05.07

黄土高原沟道耕作转型时空特征及启示 ——以延安黄土丘陵沟壑区为例

璩路路¹, 李裕瑞^{2,3}, 董世杰², 曹智^{2,3}, 刘继来⁴, 王光东⁵

(1. 重庆大学公共管理学院, 重庆400044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京100101;
3. 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安710061; 4. 信阳师范学院地理科学学院, 信阳464000; 5. 延安市治沟造地领导小组办公室, 延安716000)

摘要:深入开展黄土高原沟道农地转型过程特征与模式研究, 可为黄土高原沟道人地关系演化规律探究和农业多功能转型提供科学参考。本文以延安市的黄土丘陵沟壑区为例, 选取2012—2018年研究区12幅Landsat数据, 利用CART决策树提取沟道农地分布信息, 结合高清遥感影像数据和野外实地考察, 分析研究区沟道耕作转型过程, 进而揭示该区域沟道耕作转型的内在机制。结果发现: ①研究区沟道耕作重心由1100~1300 m范围向800~1100 m的低海拔地区转移, 且坡度范围主要集中在0~16°。②研究区沟道耕作向集聚转型, 尤其在小空间尺度上沟道耕作集聚特征更加明显, 沟道耕作转型可总结为6种地域模式, 其转型过程主要受经济社会因素和政策因素的驱动。③黄土高原沟道耕作由耕作区域内广种薄收的纯农粗放生计方式向生态经济下的集约化转型, 由传统农业向现代沟道农业转换, 功能趋于多元化, 人地系统发展趋于协调高效。研究结果不仅对探讨黄土高原沟道乡村土地利用转型、生态文明建设、人居环境改善及乡村产业发展具有参考价值, 对深入理解黄土高原沟道人地系统绿色可持续转型也具有启示意义。

关键词: 沟道耕作转型; CART决策树; 时空特征; 沟道人地系统; 延安市; 黄土高原

DOI: 10.18402/resci.2022.05.07

1 引言

土地利用转型最早由Grainger^[1]在研究以林业用地形态为主的地区时提出, 是指区域土地利用在经济社会变化与革新驱动下, 由一种形态(含显性形态和隐性形态)转变为另一种形态的过程。其中, 农地和农村宅基地是土地利用转型的重要源头, 尤其是以农业生产活动为主的农地功能形态的结构和格局转变。探讨农地功能形态转型及其转型的一般特征, 对于深入构建土地利用转型框架, 进一步服务于区域农地资源优化配置, 具有重要的

理论和实践意义^[2]。人类通过利用土地资源进行农业生产活动以满足自身生存发展, 由此引起的土地利用变化改变了乡村人地系统, 经由系统的交互反馈作用, 影响着人类经济社会及其可持续发展^[3,4]。因此, 农地利用转型也成为乡村人地系统转型的重要内容。

黄土高原生态环境脆弱、人地矛盾异常突出, 其土地利用和生态治理备受关注^[5]。新中国成立以来, 经过70多年的生态治理, 黄土高原生态建设步入了一个全新的时期。当前, 黄土高原的生态环境

收稿日期: 2021-07-16; 修订日期: 2021-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101202; 41801175); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23070300); 中央高校基本科研业务费项目(2022CDSKXYGG006); 中国博士后科学基金项目(2022M710015)。

作者简介: 璩路路, 男, 河南孟州人, 博士, 讲师, 研究方向为土地利用与城乡可持续发展。E-mail: qululu91@cqu.edu.cn

通讯作者: 李裕瑞, 男, 四川隆昌人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土地整治与村镇发展。E-mail: liyr@igsrr.ac.cn

明显好转、生产条件明显改善,尤其是退耕还林和治沟造地工程的实施改变了黄土丘陵沟壑区农业生产的空间形态,人口-粮食-生态的矛盾逐步缓解^[6]。农地综合利用向绿色协调的生态可持续之路转变,利用形态发生显著变化,蔬菜、水果等经济作物种植比例明显增加,粮食作物为主的单一种植结构类型被逐渐替代^[7]。同时经济发展促使农产品商品化、专业化及规模化水平不断提升,进而影响农业种植结构^[8],乡村人口迁移影响农地投资强度和农作物种植比例,改变农地用途类型^[9]。

目前,黄土丘陵沟壑区农地转型方向侧重于生态经济贡献能力。在强调粮食安全保障的同时,注重生态安全维护,服务于黄土高原社会、经济与环境的协调发展^[10]。随着人地系统科学理论与方法创新,以及试验研究、地理数学模型在人地系统协同观测、模拟与分析的应用与发展,针对黄土丘陵沟壑区乡村人地系统的相关研究逐步拓展到地域类型重构^[11]、聚落形态转化^[12]、地域多功能性^[13,14]、现代农业区划^[7]、地理工程应用^[15]等领域。为解决“三农”问题,保障区域粮食安全与生态建设,以及改善人居环境,农地的单功能利用须向多功能管理转型^[16]。探索黄土丘陵沟壑区沟道耕作转型过程及其作用机制对于缓解人粮关系矛盾和保障区域生态安全具有重要意义。近年来,黄土丘陵沟壑区实现了沟道与坡面协同治理、生态建设与农业生产协调发展^[17],其耕作系统已由传统粮作类型向沟道多功能粮经转型,以提高其生态经济效益^[18]。

本文关注黄土高原现代沟道型农业耕作研究,由于延安地处黄土高原丘陵沟壑区腹地核心地带,以典型黄土高原丘陵沟壑区延安的8个区(县)为研究区,通过时空拓展的CART决策树方法制定沟道农地的识别规则,深入挖掘沟道耕作转型的时空变化特征及规模强度,分别从用途转换和时空耦合的角度分析沟道耕作转型的作用机制,揭示黄土高原沟道农业转型的路径与规律,据此为类似地区的耕作利用模式及转型发展提供参考,为实现黄河流域农业高质量发展和乡村振兴战略目标提供支撑。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

延安黄土丘陵沟壑区地处黄土高原的中心地

带,同时也是黄河流域中上游与北方农牧交错区的结合地带,地理位置为35°21'N—37°31'N, 107°41'E—110°31'E。自1999年起,黄河中上游地区开始实施退耕还林还草工程,延安被列为首批试点地区之一,因其退耕还林还草规模较大、效果较好,被誉为“中国退耕还林第一市”。延安黄土丘陵沟壑区总面积1.9万km²,涵盖延安市中北部的宝塔、延长等8个区(县)(图1)。地势西高东低,地形破碎,沟、坡、梁、峁纵横交错,地貌类型十分典型。2018年研究区人均耕地面积0.12 hm²,以粮食种植为主。随着生态建设和城镇化推进,其农村特色产业发展迅速,农村居民收入持续增加,农村经济、社会 and 空间格局发生明显变化,在黄河流域高质量发展和黄土高原现代农业体系的新背景下,开展黄土高原现代沟道型农业耕作研究具有示范性作用^[15]。

2.2 数据来源

本文所用的空间数据及其来源为:①研究区土地利用数据源于2012年和2018年12幅30 m分辨率的Landsat遥感影像(<http://glovis.usgs.gov/>),以及对应的Google Earth上NASA拍摄的高清影像;②数字高程栅格数据(GDEM v2)来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);③道路矢量数据来自于OpenStreetMap公开地图网站(<http://www.openstreetmap.org>);④定位观测数据源于2014年以来,课题组在延安宝塔区站点开展的连续定位观测及典型农户的跟踪调研,以及于2018年7月和2019年8月两次赴研究区典型地带样区进行实地走访并邀请典型农户参与半结构访谈(PRA);⑤社会经济统计资料数据源于2013年和2019年《延安统计年鉴》及各区县的统计年鉴、政府工作报告及相关规划报告等。

2.3 研究方法

2.3.1 遥感影像处理

首先,对研究区Landsat数据逐期进行辐射定标、大气校正并计算NDVI值;然后,通过ENVI软件运行ISODATA非监督分类,得出初步分类图,进一步借助ArcGIS对DEM进行坡度信息提取,裁剪得到研究区坡度数据;最后对TM和OLI影像共有的蓝波段(B1)、绿波段(B2)、红波段(B3)、近红外波段(B4)、中红外波段(短波红外B5)、远红外波段

2022年5月

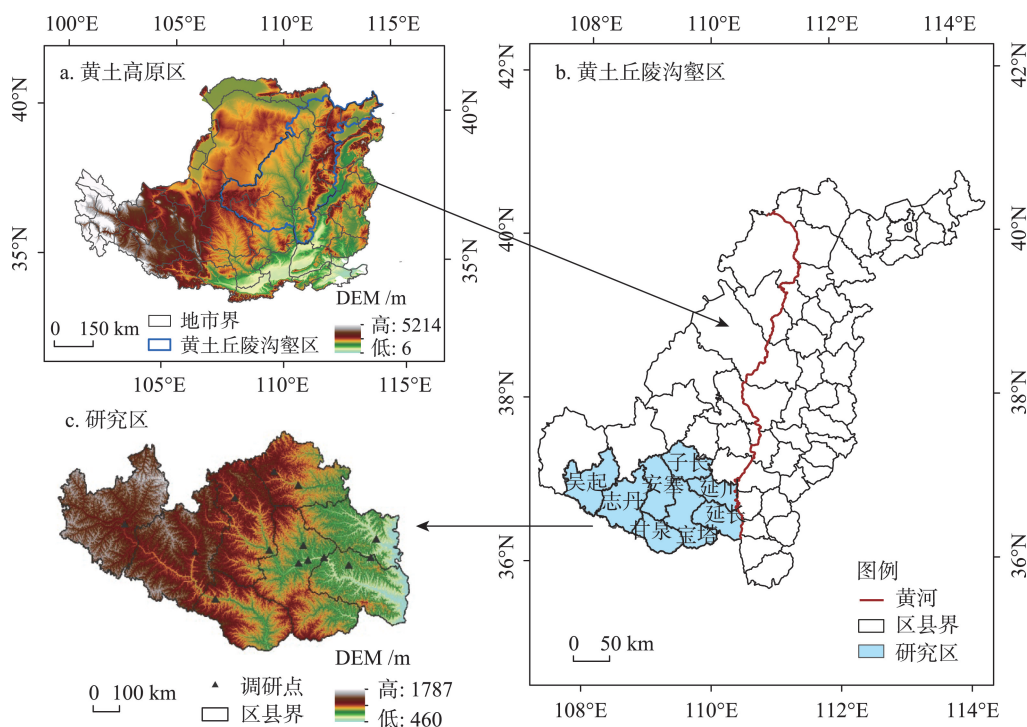


图1 研究区地理区位及调研点分布

Figure 1 Location of the study area and sites of the survey

(短波红外 B6)等6个波段与计算得出的NDVI(B7)、ISODATA非监督分类结果(B8)和坡度(B9)合并,生成九个波段的待分类影像。

2.3.2 CART决策树分类

当前遥感图像分类中,应用较为广泛的方法有人工智能神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)、决策树(DT)等。DT分类法可充分利用图像的光谱信息及其他辅助信息,有效解决遥感图像的光谱分离问题^[19],已应用于耕作状况复杂的山地丘陵区^[20],其中CART决策树分类算法采用基尼指数(Gini)作为选择最佳测试变量的标准,选取准则是所有子节点的要素特征都属于同一类别,即达到最高的纯度。CART决策树分类受外部因素影响较小,分类阈值由训练样本确定,分类精度高^[21],其公式如下:

$$Gini(D) = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2 \quad (1)$$

式中: D 是数据集即沟道农地图斑的信息集; m 是元素类别个数; p_i 是元组中类别 i 的分布概率。

2.3.3 沟道农地识别

沟道农地的识别步骤:①首先提取基期年2018年农地范围作为沟道农地的背景数据;②根据沟道

农地收缩变化得到研究起始年份的像元(t);③根据2018年沟道农地的范围,再次提取2012年疑似沟道农地和2018年沟道农地的重叠部分,迭代识别规定年份2012年沟道农地范围。当地的沟道农地生产类型可分为6类:①类型I(经果林):整齐集中,颜色较深,纹理为点状,树木个体清晰;②类型II(大棚蔬菜):宽度基本一致,呈规则矩形,周边有一定的道路及建筑,塑料大棚反射率高,成像清晰可辨;③类型III(坑塘养殖):呈较为规则的多边形,颜色深度较大,主要为墨绿色;④类型IV(粮作种植):在生长季为绿色,其余季节呈成片的黄褐色,呈条带状;⑤类型V(桑叶种植):呈条带分布,表现为阶梯状,宽度较大;⑥类型VI(烟叶种植):呈条带分布,纹理较细,宽度略窄。

2.3.4 Ripley K函数

Ripley K函数是一种多距离空间聚类的分析工具,在多尺度空间格局分析中具有明显优势,本文用该方法对沟道耕作类型进行空间集聚特征分析。其基本原理是通过设置固定的空间尺度为单位计算不同空间尺度下的分布格局^[22],其数学表达式如下:

$$K(d) = A \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^r \frac{\delta_{kj}(d)}{r^2} \quad (2)$$

$$L(d) = \sqrt{\frac{K(d)}{\pi - d}} \quad (3)$$

式中: A 为研究区面积(km^2); r 表示耕作图斑个数; d 为空间尺度(km); $\delta_{kj}(d)$ 表示点 k 和点 j 间的距离值;对Ripley K 函数 $K(d)$ 进行开方变换得到 $L(d)$,如 $L(d)>0$,说明研究对象呈空间集聚,反之分散,若 $L(d)=0$,表示随机分布。

2.3.5 地理探测器

地理探测器是一种多因子交互作用的统计模型,该模型将各类因子置于同一空间坐标系下,结合地理空间叠加技术手段,通过“因子力”实现定量测度分析^[23],其数学表达式为:

$$q = 1 - \frac{1}{u\sigma^2} \sum_{h=1}^m n_h \delta_h^2 \quad (4)$$

式中: q 为影响因素力; u 为总样本数; n_h 为影响因

子类型 h (对应一个或多个子区域)的样本数; δ_h^2 为离散方差; σ^2 为总方差值。 q 的取值区间在0到1之间, q 值越大,决定力就越大。

3 结果与分析

3.1 沟道耕作转型时空分布特征

将研究区不同类型的沟道耕作农地图斑与高程、坡度等地形要素分别进行叠置分析,得到2012年和2018年沟道农地耕作高程、坡度的分布特征(图2、图3)。结合研究区实际,参考相关文献^[20,24],高程和坡度分别选取100 m和 4° 的等间隔进行分级,将研究区分成10个等级。高程方面,类型I在高程分级的3~6级之间比例达到12%~35%,其中第4级(900~1000 m)分布最多;类型II集中在4~7级高程带,其中,类型II在第5级(1000~1100 m)高程带分布比例达到28.67%;类型III一半以上分布在第5级,另外在4与6级面积占比超过20%,在其他等级

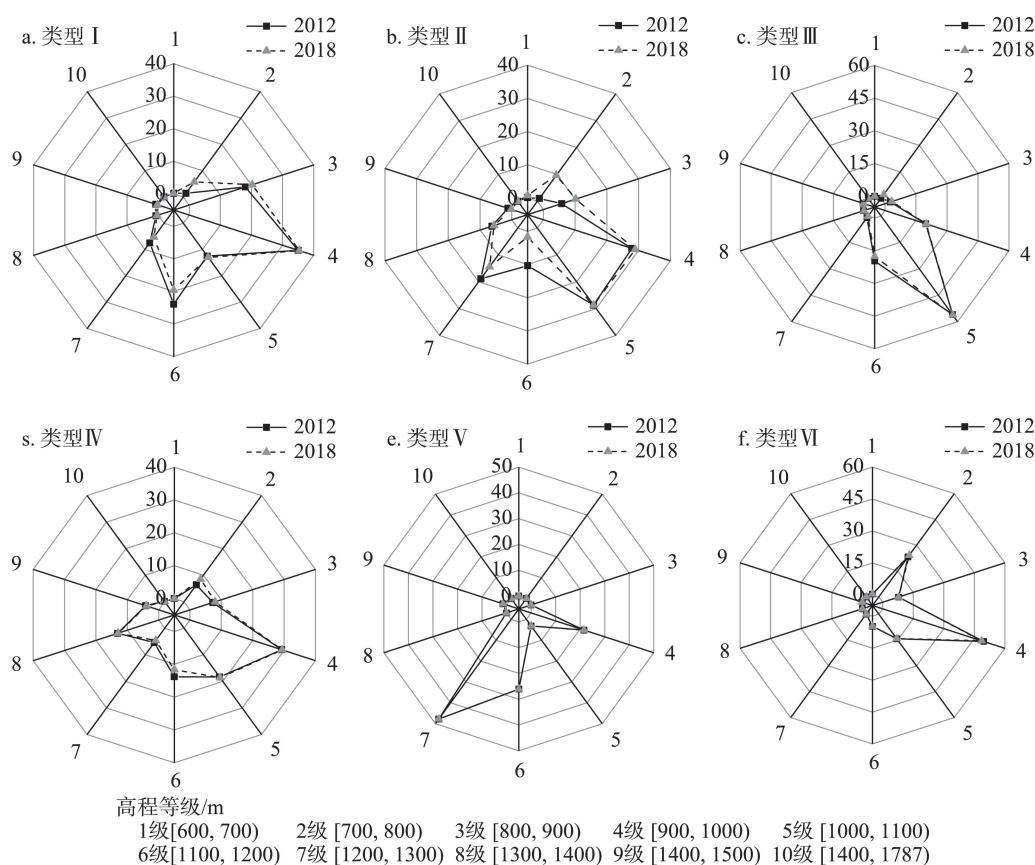


图2 2012、2018年研究区沟道耕作农地高程分布特征

Figure 2 Elevation distribution characteristics of gully farmland in the study area, 2012 and 2018

2022年5月

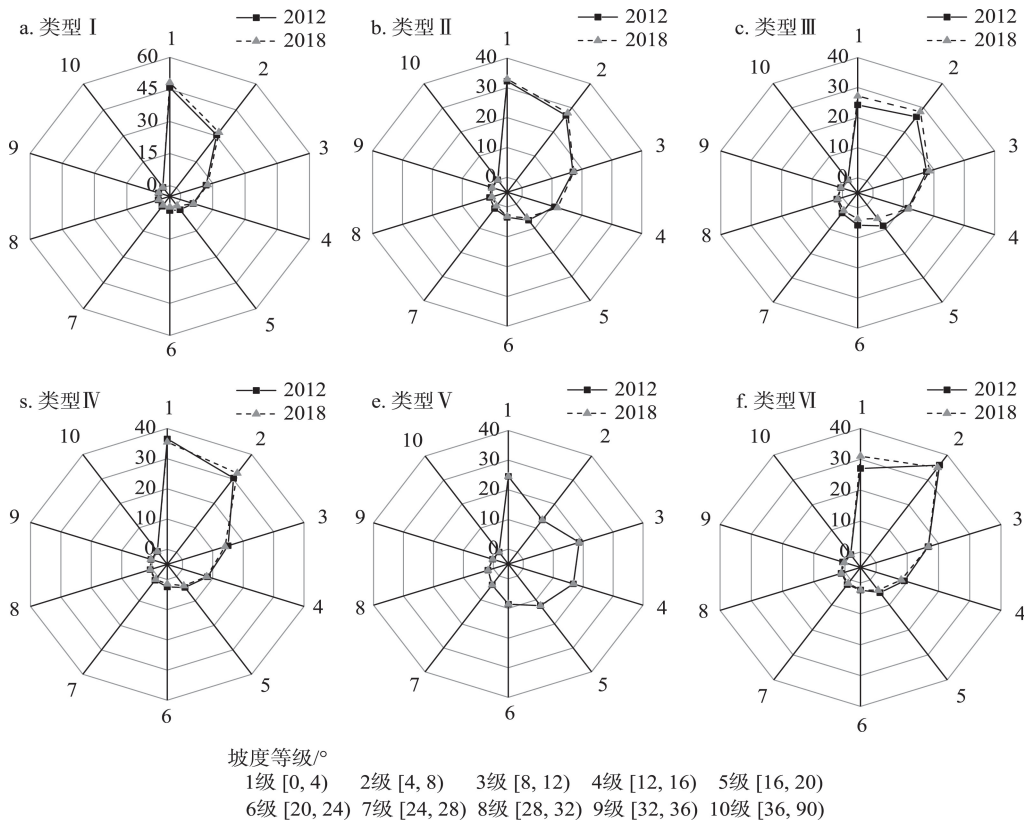


图3 2012、2018年研究区沟道耕作农地坡度分布特征

Figure 3 Slope distribution characteristics of gully farmland in the study area, 2012 and 2018

分布极少;类型IV在各等级分布相对均匀,类型V主要集中分布在6和7级两个高程带,两类型分别在第4级(900~1000 m)和第7级(1200~1300 m)达到峰值,分别为29.24%和47.76%;类型VI在第4级分布最多,高达49.61%,其次是第2和第5级。

坡度方面,整体趋势是集中分布于低坡度带内,类型I主要分布在坡度分级1~4之间,其中在1等级坡度范围($0\sim4^{\circ}$)分布最多,比值高达45.92%;类型II和类型III在1~5级坡度带内,分布较为相似,占比均在8%~27%之间;类型III和类型IV在第2级分布最多,其中,类型IV在6~9级上也有一定的分布。类型V和类型VI则主要分布在1~5级坡度带。表明2012年研究区主要耕作活动高程范围在1100 m以内,耕作坡度范围在 $0\sim20^{\circ}$ 之间。

与2012年相比,2018年耕作分布整体上向低海拔和缓坡地迁移。具体地,在海拔方面,类型I仍在3~6级高程带集中,但分布比例有所提高,高达35.41%(4级高程带)和20.23%(3级高程带);类型II

则向4、5级高程带转移,两级面积占比相当且均在28%左右;类型III也于4、5的两个分级内集中分布,并在第5级达到最高,由占比55.93%上升到56.19%,其次是第4等级,由占比19.77%上升到19.93%;类型IV的29.41%分布在3级高程带,分布占比最高,并除第9级分布较少外,在其他等级分布相对均匀;类型V和类型VI变化较不明显,其中类型V在1、2、3、8和9级内分布相对较少,主要分布在4、6和7级的高程带,接近一半(47.76%)分布在7级;类型VI主要分布在2~5级高程带(80.62%),其中在4级高程带占比48.59%。坡度分布的整体趋势是随坡度增大,分布面积递减,具体为类型I主要分布在1~3级的缓坡地带,类型II和类型III主要分布在1~5级坡度带;类型IV、类型V和类型VI主要分布在1~4级坡度带,其中,类型V在6~8级坡度带也有相当比例的分布。综上,2012—2018年间的沟道农地的耕作空间整体重心由1100~1300 m范围内的中海拔地区向800~1100 m内的中低海拔沟道转移,在

耕作空间转型发展过程中,坡度分布变化主要集中在 $0\sim 16^\circ$ 内,但从发展趋势来看,耕作分布的坡度范围有逐渐变缓的趋势。

3.2 沟道耕作转型时空集聚特征

图4为研究区2012年沟道耕作类型在不同空间尺度上的集聚特征。类型I的特征空间尺度大小为18 km,大于该空间尺度,该类型分布的集聚性也相对会减弱;类型II特征空间尺度大于类型I,达到

23 km;类型III为15 km左右;类型V和类型VI都在12 km以下;类型IV最小,在4 km以下,超过此值,集聚便不明显。整体来看,研究区沟道耕作空间集聚分布类型的排序为:II>I>III>V>VI>IV,表明2012年研究区粮作种植的空间发生点较其他耕作类型分布均匀。

相比于2012年沟道农地的集聚变化,2018年耕作空间集聚趋于均匀分布(图5)。整体上空间集聚

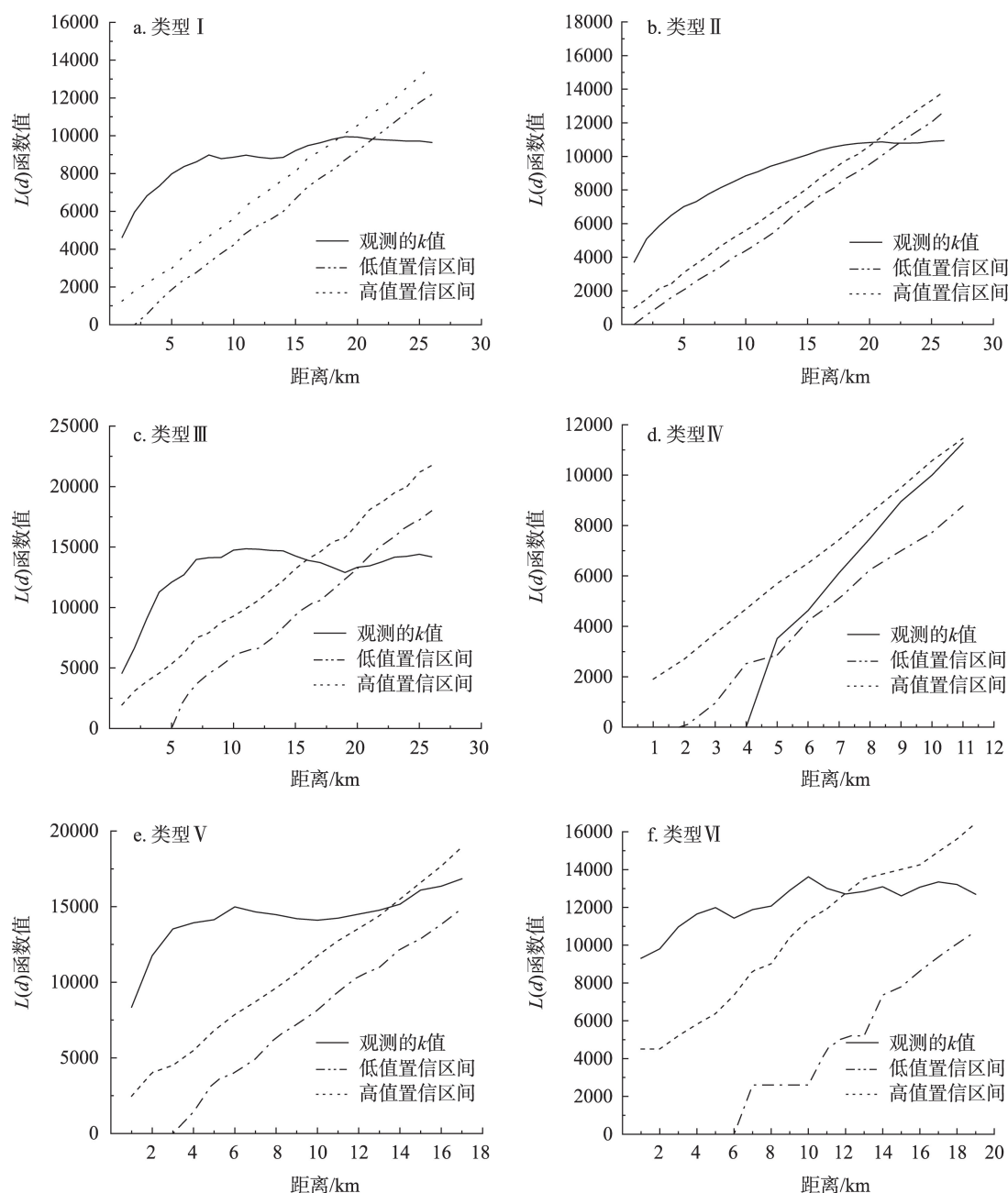


图4 2012年沟道耕作农地集聚变化特征

Figure 4 Characteristics of gully farmland agglomeration, 2012

2022年5月

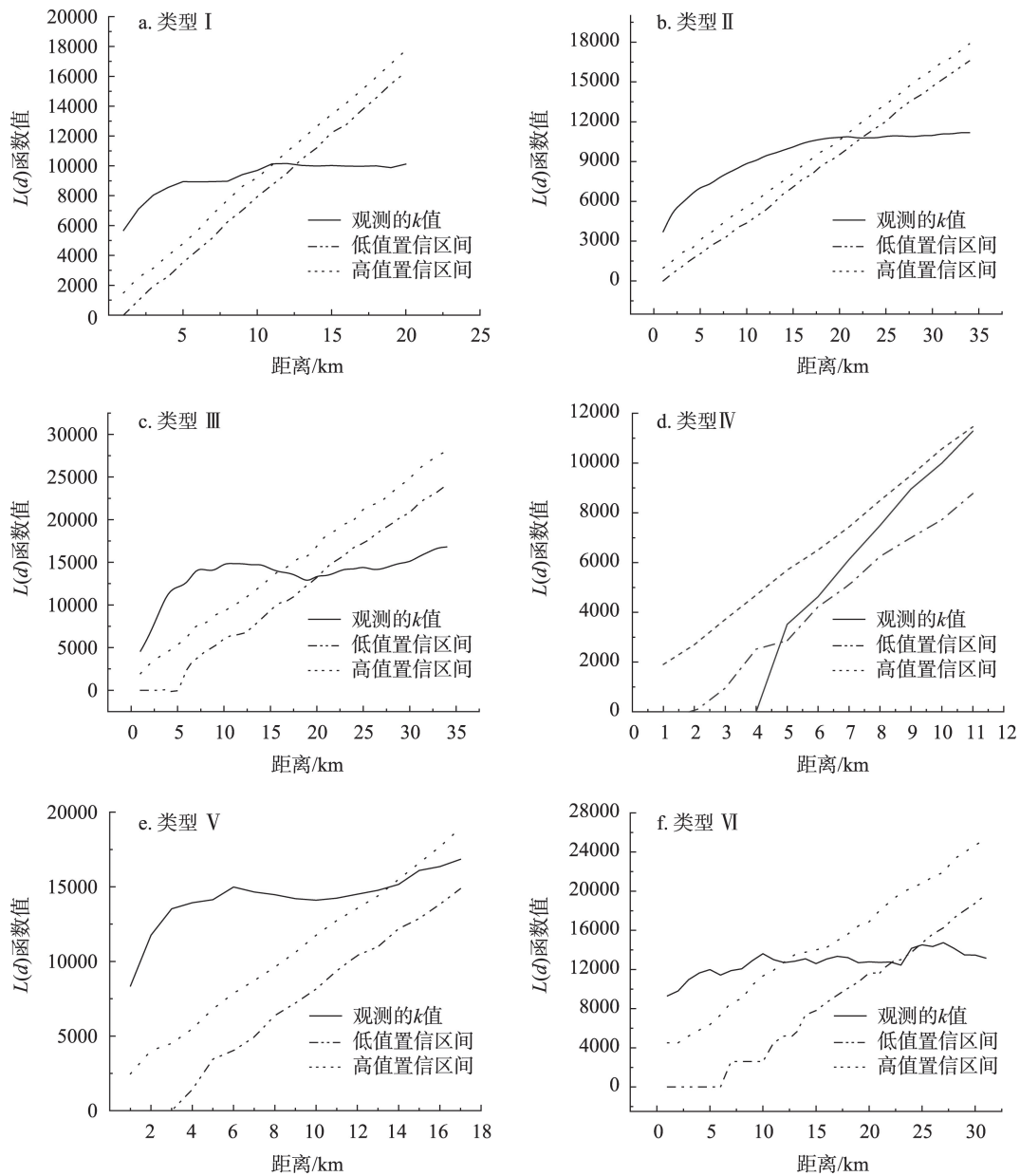


图5 2018年沟道耕作农地集聚变化特征

Figure 5 Characteristics of gully farmland agglomeration, 2018

程度大小排序为 $II > III > V > I > VI > IV$, 类型 I 的特征空间尺度减小为 8 km; 类型 II、III、IV、V、VI 的特征空间尺度依次为: 21 km、11 km、5 km、10 km 和 6 km, 其中, 类型 IV 的特征空间尺度最小, 但在 4 km 区间内表现为高度集聚, 这与研究区 2018 年后沟道耕作的规模连片集中有一定的关系。研究区沟道农地耕作转型主要发生在东部海拔较低以及沟谷川道平坝耕地面积较大的区域, 与该区域沟道耕作的高程分级变化有一定的对应关系, 同时沟道

耕作覆盖区有所增加, 说明该阶段研究区沟道农地的整治速度加快。

3.3 沟道耕作转型模式

通过分析不同类型沟道耕作方式间的演变以及沟道耕作的集聚特征, 提炼出 6 种耕作转型模式 (图 6)。在时间序列上, 根据 2012—2018 年沟道耕作的增长变化划分为跳跃型(a)、停滞型(b)和连续型(c)3 种模式: ①跳跃型。该模式沟道耕作转型在年限上跨度较大, 多分布于沟口开阔的地段, 表征

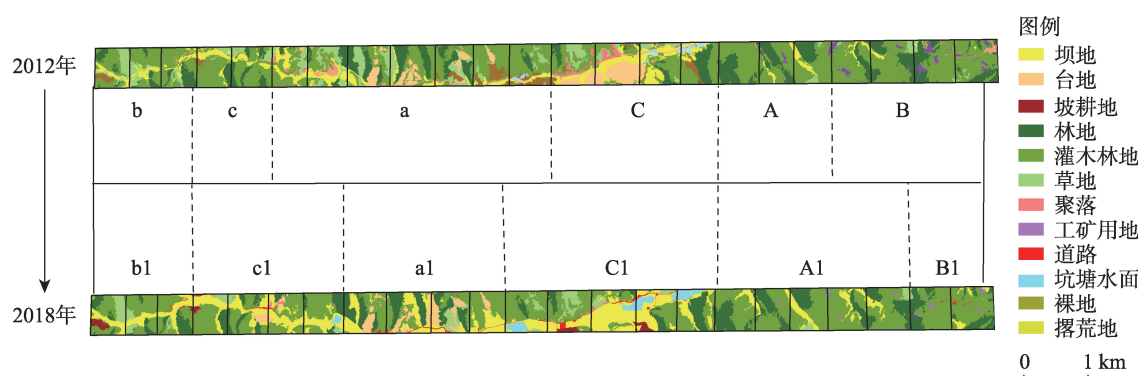


图6 沟道耕作转型模式

Figure 6 Pattern of gully farming transformation

注:a、a1为跳跃型,b、b1为停滞型,c、c1为连续型,A、A1为生态型,B、B1为经济型,C、C1为居业型。

为沟道耕作面积在原有基础上“跃迁式”变化,这可能与政府的政策指向有关,2013年该区域实施治沟造地土地整治工程使得沟道耕地面积显著增加。据此可以推测沟道整治等政策因素可能对沟道农地转型有显著助推作用。②停滞型。该模式沟道耕作转型不明显,多分布于坡度较大、坡地较多、水土流失严重和交通不便的沟头地带,农业水土资源等生产环境受限、农户劳动力不足等对此模式影响明显。该模式的出现同时表明该区域沟道农业关键要素发展落后,沟道耕作方式亟需转型适应。③连续型。该模式沟道耕作转型按照2012—2018年的时间顺序平稳增长,沟道耕作方式的变化较为均匀,多集聚于相对开阔,坡度相对平缓的中间地段,投资力度加大和沟道生产适宜程度提高可促使此类情形发生,同时社会经济的持续发展使得沟道农地规模逐渐扩大,该模式是沟道地域较为稳定的连续发展型模式。

在空间维度上,基于沟道耕作与其他地类(乡村聚落居民点用地、生态林地等)的空间耦合关系划分为生态型(A)、经济型(B)和居业型(C)3种模式:①生态型。多分布于以村庄为中心的外缘区,该模式沟道耕作转型是以生态建设为导向,主要侧重粮果种植,在沟道及边坡种植特色经果,同时作为水土保持工程手段可以减少水土流失、预防沟道滑坡等自然灾害。生态效益提升是该类模式下沟道农地耕作转型的侧重点。②经济型。该模式沟道耕作转型是以经济效益为导向,在扩大经济作物

种植面积的同时以减少林地等生态用地为代价。该类模式多侧重短期生产的经济效益,对生态环境的考虑相对较少。③居业型。该模式沟道耕作转型是在保证生态经济“双重”效益的基础上以实现居业关系改善为目标,较常发生在聚落居民点附近,耕作方便,功能性更强。该模式的沟道耕作转型是在结合经济与生态“双重”导向下,注重与沟道文化、景观、休闲、康养等增值价值的融合。

综上,沟道耕作转型存在一定的规律性。2018年研究区延安黄土高原沟道耕作类型I(沟道及边坡台地的耕作农田)和类型II(现代果业,包括产业经济作物)与2012年的类型I(林果)和类型IV(种植业)在较短的时间段(6年的演变时间差)呈对应关系。此外,2018年的土地整治现代农业在2012年类型III(坑塘养殖)的基础上形成了从种植、养殖、加工到旅游观光服务为一体的沟道观光农业链条,这与政府长期以来实施的沟坡治理工程、农业结构调整、新型农村社区化等政策的大力促进有关,尤其是2013年开始实施的沟道土地整治工程,表明政策因素对沟道耕作转型有明显的助推作用,与此同时该区域短时期内沟坡治理效果较为显著。图2、图3高程和坡度的分级结果比对也间接印证了本文数据的精确性。整体上,耕作重心向低海拔迁移,耕作方式向集聚转变,耕作模式向集约利用转型。

3.4 沟道耕作转型的影响因素

黄土高原丘陵沟壑区农业的核心在沟道,准确把握沟道耕作转型空间特征及影响因素,可为黄土

2022年5月

高原农业优化调控提供科学指导,支撑实现黄河流域高质量发展目标。参照相关文献^[25,26],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4个方面选取驱动因子,借助地理探测器,得到各探测因子的影响力 p 值分级图(图7)。通过不同尺度下的影响因素分析可从不同类型分析及宏观区域政策响应深入挖掘沟道耕作转型的作用机制。

①沟道耕作转型整体尺度探测因子主要贡献是一产从业占比、人口密度、坡度、距乡镇行政中心距离和距县城行政中心距离,而地形起伏度、距高速公路的距离等因子相对滞后。②不同类型沟道耕作转型驱动因素分析:类型I显著贡献因子是坡度以及距高速和县道的距离,经果林种植对自然因子依赖性强。类型II显著贡献因素是人口密度、距县行政中心的距离和坡度,这与蔬菜产业的蓬勃发展与城镇化率的提高有关。类型III显著贡献因子是距水域的距离、距乡镇和县行政中心的距离。类型IV显著贡献因子是人口密度,其次是地形起伏度、距高速和省道的距离,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,大力发展现代农业产业后,出现了一批机械化

生产和规模化种植,类型V显著贡献因子是一产从业占比、距水域和省道的距离以及人口密度等。类型VI显著贡献因子是距省道的距离、一产从业占比以及坡地、坡向等自然因子。③沟道耕地的增长部分主要在高程700~1300 m,地形起伏度40~180 m和坡度0~16°之间,即较平缓的低海拔平坝区域。沟道耕作油料、桑叶及烟叶的增长与河流、县道与省道的距离密切相关,其增长分布主要在距河流5 km,距主要干道的18 km范围内^[13],总体上,由图可看出乡镇地域中心相比于区(县)地域中心对耕作种植的影响更为显著。经果林与蔬菜两大经济作物均具有较强的市场区位指向性,呈现“自下至上”市场区位导向。

综上,沟道耕作转型是由政策、经济、社会、文化、自然等多重因素综合作用的结果。总体而言,黄土高原沟道耕作转型主要受社会经济因素与自然因素驱动(图8),沟道耕作转型多发生在河流水域较近的水源补给农业带以及与人类活动关系紧密的道路、乡村聚居点较近区域,研究表明在丘陵沟壑区更多表现为乡镇范围内的集聚性,并呈现“自下至上”的市场区位导向规律。此外,由于研究区处于半干旱地带,农业发展面临的主要问题在于区域性水资源匮乏,加上研究区气候变暖等,河流对于沟道耕作转型的影响将进一步增强。

4 黄土高原沟道耕作转型路径及启示

以市场为导向的集约式农业逐渐取代生态导向的粗放式农业,农地耕作转型变换即为粗放式与市场高度集约化农业之间的连续体^[27]。传统平原农区的耕地利用由于地形、气候等种植适宜性,多以规模化机械化耕作的生产功能为主^[28];东部沿海地区及大城市郊区则以休闲观光功能为主,并集中于农业结构优化、劳动就业转移、生态环境改善等方面^[29]。延安黄土丘陵沟壑区耕作转型是农民群体的坡耕地撂荒、经果林种植等行为,以及山下治沟造地发展现代沟道农业和山上植树造林生态退耕的综合作用结果^[15,30]。研究区作为中国集农牧交错、生态脆弱、经济滞后为一体的特殊区域,其耕作转型是农户主体需求的经济效益与政府主导的生态政策共同作用的结果,同时也是集约化产业化的多

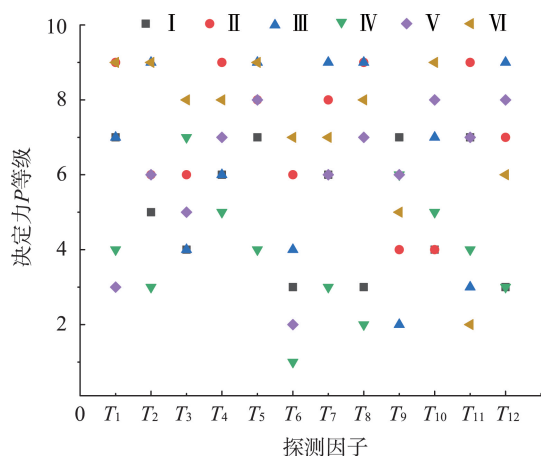


图7 研究区探测因子决定力 P 值分级

Figure 7 Classification of detection factor determining power P value in the study area

注:①自然:坡度(T_1)、坡向(T_2)、地形起伏度(T_3);②社会经济:人口密度(T_4)、一产从业占比(T_5)、城镇化率(T_6);③区位:距区县行政中心(T_7)、距乡镇行政中心(T_8);④邻域:距高速公路(T_9)、距省道(T_{10})、距县道(T_{11})、距水域(T_{12})的距离。

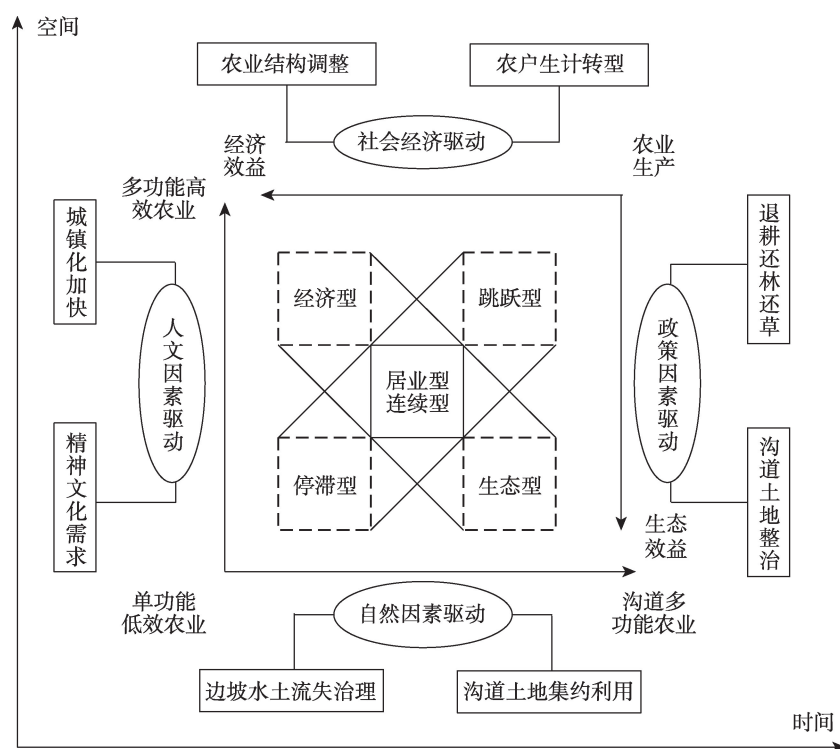


图8 黄土高原沟道农作转型作用机制

Figure 8 Mechanism of gully agriculture transformation on the Loess Plateau

功能农业用地转向,其本质是与经济社会发展阶段相适应的功能转型过程。

沟道耕作转型是从以农业生产为主的单功能低效农业向生态经济导向的多功能现代沟道高效农业发展,但在整体发展过程中,会向经济或生态的单方面侧重,只有在经济或生态均衡的前提下,追求居业协同优化,才能最大限度地实现沟道农地利用和沟道农业的可持续,这也决定着未来黄土丘陵沟壑区沟道耕作转型的方向。由于自然条件约束,长期以来黄土丘陵沟壑区农业生产主要在集中在坡面上,因此农业生产经营效率始终不高,广种薄收的粗放式开发利用,一定程度上深化了区域的人地关系矛盾。随着时间的推移,沟道作为丘陵沟壑区沟道地域特有的土地利用空间,与区域经济社会发展阶段相适应,逐渐由坡面开疆拓土式的粗放开发利用向沟道坝地生产集约式转型。宏观主导功能和微观区域功能布局的演化路径,分别在区域和沟域尺度上呈现明显空间差异。新时期黄土高原沟道农地耕作应立足于经济-生态“双赢”目标,着眼于生态文明、绿色可持续发展^[31],以“山上退耕

还林,山下治沟造地”为转型发展的重要平台,统筹流域上下协同,沟道与边坡协同,多尺度分类统筹协调,发挥地理工程的技术支撑作用,创新沟道农业生产经营方式及管理模式,促进现代沟道农业提质增效和绿色高质量发展。

除了种植生产力的提升,野外实地调查还表明,研究区增强型治沟造地特别是农田林网工程是以实现生态和经济效益的“双赢”目标,遵循了“以林代林、以田代田”原则,达到了景观协调和功能高效,同时以作物间种来加固农田林网,进一步提高区域生态经济效益。沟道农地的发展确定了区域农业的转型方向,为新时期黄土丘陵沟壑区现代农业可持续发展和生态安全提供了保障。

5 结论

本文借助沟道耕作类型的遥感影像解译数据以及定位观测调研数据,探讨了研究区沟道耕作转型的时空演变特征,揭示了沟道耕作类型结构及功能转型的影响因素,得到以下结论:

(1)2012—2018年,研究区全域沟道耕作重心由1100~1300 m范围内的中海拔地区向800~1100 m

2022年5月

内的中低海拔转移,在耕作空间转型过程中,坡度分布变化主要集中在 $0^{\circ}\sim 16^{\circ}$ 之间,从发展趋势来看,耕作分布的坡度范围有逐渐变缓的趋势。

(2)沟道耕作转型多发生在距河流域较近以及与人类活动影响紧密的道路、乡村聚居点较近区域,并呈现中心集聚转型特征,尤其在尺度空间上沟道耕作集聚特征更加明显。黄土高原沟道耕作转型存在6种地域模式,其转型过程主要受经济社会因素与政策因素驱动。

(3)黄土高原沟道耕作正逐步由耕作区域内广种薄收的纯农粗放生计方式,通过边坡生态退耕、沟道土地整治等方式,向生态经济下的集约利用转型,由传统农业向现代沟道农业转换,功能趋于多元化,实现了沟道农地种植模式和农民生计转型,促使人地系统发展趋于协调高效。

参考文献(References):

- [1] Grainger A. National land use morphology: Patterns and possibilities[J]. *Geography*, 1995, 80(3): 235-245.
- [2] 龙花楼. 论土地利用转型与乡村转型发展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(2): 131-138. [Long H L. Land use transition and rural transformation development[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(2): 131-138.]
- [3] 刘彦随. 现代地人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.]
- [4] 刘彦随. 土地综合研究与土地资源工程[J]. *资源科学*, 2015, 37(1): 1-8. [Liu Y S. Integrated land research resources engineering[J]. *Resources Science*, 2015, 37(1): 1-8.]
- [5] 傅伯杰, 赵文武, 张秋菊, 等. 黄土高原景观格局变化与土壤侵蚀[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Fu B J, Zhao W W, Zhang Q J, et al. *Landscape Pattern Change and Soil Erosion in the Loess Plateau*[M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [6] 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(1): 339-350.
- [7] 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.]
- [8] 杨华, 芮旻, 李炬霖, 等. 陕西省农业现代化水平时空特征及障

- 碍因素[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 172-183. [Yang H, Rui Y, Li J L, et al. Spatiotemporal characteristics of agricultural modernization level and obstacles in Shaanxi Province[J]. *Resources Science*, 2020, 42(1): 172-183.]
- [9] 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 Study*, 2019, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2019.04.003.
- [10] 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.]
- [11] 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, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143676.
- [12] 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. [Chen Z F, Li Y R, Liu Y S. Distribution pattern characteristic and type classification of rural settlements in Loess-Gully Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 266-274.]
- [13] 璩路路, 王永生, 李裕瑞, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道农业生产功能空间演变特征及其启示[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(21): 259-268. [Qu L L, Wang Y S, Li Y R, et al. Spatial evolution of gully agricultural production function and its enlightenment in Loess Hilly and Gully Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(21): 259-268.]
- [14] 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, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142415.
- [15] 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.]
- [16] 宋小青, 欧阳竹. 耕地多功能内涵及其对耕地保护的启示[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 859-868. [Song X Q, Ou Y Z. Connotation of multifunctional cultivated land and its implications for cultivated land protection[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(7): 859-868.]
- [17] 刘彦随, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 1-9. [Liu Y S, Li Y R. Engineering philosophy and design scheme of gully land consolidation in Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 1-9.]
- [18] 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.
- [19] 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, (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, (2): 33-36.]
- [20] Yang Y P, Yang D, Wang X F, et al. Testing accuracy of land cover classification algorithms in the Qilian Mountains based on GEE cloud platform[J]. Remote Sensing, 2021, DOI: 10.3390/rs13245064.
- [21] 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]. National Remote Sensing Bulletin, 2005, 9(6): 708-716.]
- [22] 高凯, 周志翔, 杨玉萍, 等. 基于Ripley K函数的武汉市景观格局特征及其变化[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2621-2626. [Gao K, Zhou Z X, Yang Y P, et al. Characteristics and changes of landscape pattern in Wuhan City based on Ripley's K function[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2621-2626.]
- [23] 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 perspective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]
- [24] 刘丹, 李琳娜. 1995-2015年中国北方边境样带土地利用时空格局演变及驱动因素[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1208-1221. [Liu D, Li L N. Spatiotemporal change and driving factors of land use in the northern border transect of China, 1995-2015[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1208-1221.]
- [25] 李裕瑞, 常贵蒋, 曹丽哲, 等. 论乡村能人与乡村发展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1632-1642. [Li Y R, Chang G J, Cao L Z, et al. Rural elite and rural development[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1632-1642.]
- [26] Qu L L, Li Y R, Huang Y X, et al. Analysis of the spatial variations of determinants of gully agricultural production transformation in the Chinese Loess Plateau and its policy implications[J]. Land, 2021, DOI: 10.3390/land10090901.
- [27] Amjathbabu T S, Kaechele H. Agricultural system transitions in selected Indian states: What do the related indicators say about the underlying biodiversity changes and economic trade-offs[J]. Ecological Indicators, 2015, 57: 171-181.
- [28] 黄海潮, 温良友, 孔祥斌, 等. 中国耕地空间格局演化对耕地适宜性的影响及政策启示[J]. 中国土地科学, 2021, 35(2): 61-70. [Huang H C, Wen L Y, Kong X B, et al. the impact of spatial pattern evolution of cultivated land on cultivated land suitability in china and its policy implication[J]. China Land Science, 2021, 35(2): 61-70.]
- [29] 范业婷, 金晓斌, 项晓敏, 等. 苏南地区耕地多功能评价与空间特征分析[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 980-992. [Fan Y T, Jin X B, Xiang X M, et al. Evaluation and spatial characteristics of arable land multifunction in southern Jiangsu[J]. Resources Science, 2018, 40(5): 980-992.]
- [30] 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, DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104087.
- [31] 刘彦随, 龙花楼, 李裕瑞. 全球城乡关系新认知与人文地理学研究[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 2869-2884. [Liu Y S, Long H L, Li Y R. Human geography research based on the new thinking of global rural-urban relationship[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 2869-2884.]

Spatiotemporal characteristics of gully farming transformation on the Loess Plateau and implications: A case study of the Yan'an Loess Hilly and Gully Region

QU Lulu¹, LI Yurui^{2,3}, DONG Shijie², CAO Zhi^{2,3}, LIU Jilai⁴, WANG Guangdong⁵

(1. School of Public Policy and Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China; 4. School of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 5. Gully Land Consolidation Leading Group Office in Yan'an, Yan'an 716000, China)

Abstract: In-depth research on the characteristics and models of the transformation process of gully farming land on the Loess Plateau can provide scientific reference for the evolution law of human-land relationship and agricultural multi-functional transformation in the region. Taking Yan'an City of the loess hilly and gully region as an example, this study used 12 Landsat TM/OLI images in 2012-2018 and the CART (Classification And Regression Tree) decision tree to extract the distribution information of gully farming land, combined with high-definition remote sensing image data and field investigation, to analyze the process of gully farming transformation in the study area and reveal the internal mechanism of gully farming transformation on the Loess Plateau. The results show that: (1) The gully farming transformation center of gravity in the Yan'an loess hilly and gully region has shifted from 1100~1300 m altitude to the low-altitude area of 800~1100 m, and the slope of the area is 0~16°. (2) Gully farming in the study area is transforming to agglomeration, especially at small spatial scales. Gully farming conversion can be categorized into six regional change patterns on micro and macro scales, and the process of change is mainly driven by socioeconomic and policy factors. (3) Gully farming on the Loess Plateau is gradually transforming from sole agricultural livelihood with extensive utilization of land to intensive utilization under ecological economic development. The transformation from traditional agriculture to modern gully agriculture has diversified the functions of the land and promoted the coordinated and efficient development of the human-land system. The research results not only have important reference value for rural land use transformation, ecological civilization construction, improvement of human settlements, and rural industrial development and transformation of the Loess Plateau, but also have implications for understanding the green and sustainable transformation of the human-land system on the Loess Plateau.

Key words: gully farming transformation; CART decision tree; spatiotemporal characteristics; gully human-land system science; Yan'an City; Loess Plateau