

引用格式:孙丕苓,曲琳,刘庆果,等.中国北方农牧交错带生态退耕时空分异及驱动因素[J].资源科学,2022,44(5):943-954.
[Sun P L, Qu L, Liu Q G, et al. Spatiotemporal differentiation characteristics and driving factors of ecological restoration in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 943-954.] DOI: 10.18402/resci.2022.05.06

中国北方农牧交错带生态退耕时空分异及驱动因素

孙丕苓^{1,2,3}, 曲琳¹, 刘庆果¹, 许月卿^{2,4}, 宫巧巧^{1,3}

(1. 曲阜师范大学地理与旅游学院,日照 276826;2. 中国农业大学土地科学与技术学院,北京 100193;3. 日照市国土空间规划与生态建设重点实验室,日照 276826;4. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室,北京 100193)

摘要:厘清生态退耕时空格局及驱动因素对中国北方农牧交错带生态系统结构调整与生态修复具有重要意义。基于退耕指数、空间自相关分析、地理探测器等方法模型,剖析2000-2020年中国北方农牧交错带生态退耕时空分异特征,探究其驱动因素。结果表明:①2000—2020年中国北方农牧交错带生态退耕面积为27617.84 km²,年均退耕面积为1380.89 km²,退耕指数为10.27%,退耕耕地主要转化为草地、林地和水域,占退耕总面积的75.20%。②2000—2020年北方农牧交错带生态退耕空间集聚特征显著,高值集聚区趋于山区集中,并由东北向西南扩展,低值集聚区趋于省际边缘、市区及周边地区集中分布,呈现向东北转移态势。③生态退耕时空分异受自然因素、社会经济因素及政策因素的共同影响。坡向、海拔高程、生态工程数量、路网密度、年均降水量的影响程度不断增强,生态管控面积比、城镇化水平、年均气温的影响程度有所降低。各驱动因子交互作用对生态退耕时空分异呈现双因子增强和非线性增强效应。本文结果可为北方农牧交错带科学推进生态系统结构优化与生态文明建设提供参考。

关键词:生态退耕;时空分异;驱动因素;地理探测器模型;北方农牧交错带

DOI:10.18402/resci.2022.05.06

1 引言

土地是陆地生态系统的主要载体,其利用方式的改变必然导致生态系统结构与功能的变化^[1]。长期以来,由于毁林开荒、陡坡垦殖、滥砍滥伐等人类不合理的开发利用活动,中国生态系统退化严重,水土流失、土地沙化、泥石流等灾害频发,严重影响人类生产、生活,危及国家生态安全。为缓解区域生态压力、改善生态环境、提高人类福祉,中国政府实施了“三北”防护林、太行山绿化、京津风沙源治理等一系列生态建设工程^[2]。随着退耕还林(草、湿)、重点防护林体系建设、平原绿化等生态工程的开展,导致大尺度的土地利用/覆被变化并对区域生

态环境产生深远影响,引起国家各级政府及学术界的广泛关注,生态环境敏感且脆弱山地丘陵区成为相关问题研究的热点地区^[3-5]。因此,厘清生态脆弱地区的生态退耕时空格局及驱动因素,对区域生态系统结构调整与生态修复具有重要意义。

生态退耕是以生态修复为目的对不适宜耕作的土地进行退耕还林、还草、还湿(水)的过程^[6,7],能够有效缓解区域土地利用与生态环境之间的矛盾^[8],具有复杂的时空分异特征。国内外学者基于不同的学科视角围绕生态退耕的时空格局及影响因素^[7,9,10]、空间优化与权衡调控^[11]、效益与影响^[12-15]等方面开展了大量实证研究,其中生态退耕的影响研究主

收稿日期:2021-09-27 修订日期:2021-12-14

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42101258);教育部人文社会科学研究青年基金项目(19YJCZH144);山东省自然科学基金青年项目(ZR2019QD006)。

作者简介:孙丕苓,女,山东泰安人,副教授,硕士生导师,主要从事土地利用/覆被变化及其生态效应、土地利用多功能、乡村地理等方面的研究。E-mail: spling86@qfnu.edu.cn

要关注生态退耕引起的区域土地利用变化^[16,17]、景观格局变化^[3,10]、气候变化^[14]、生态风险变化^[15,18]、农户生计变化^[13,19]以及生态退耕对土壤保持^[20]、植被演替^[15,21]、生态系统服务^[22-24]、粮食安全^[25,26]的影响程度等方面。杜国明等^[7,10]研究了黄土高原丘陵地区生态退耕的地域差异,分析了地形因素、人文因素对生态退耕时空异质性的影响;刘超等^[2]、杜国明等^[7]分析了北方农牧交错区、黄土高原地区的生态退耕工程对土地利用方式及方向的影响;Liu等^[5]运用面板数据定量评估了毛乌素沙地生态退耕政策的贡献;Wu等^[19]基于双重差分模型和能值分析方法从区域和家庭层面探究黄土高原地区退耕还林工程对农村与农户生计的影响;Stoddard等^[14]、Tuten等^[16]分别研究了生态退耕工程对美国亚利桑那州北部、美国西南部森林结构变化的影响;Wang等^[23]、Constant等^[24]、刘贤赵等^[25]分别研究了生态退耕对生态系统服务价值、粮食生产的影响程度。近年来,随着生态文明建设战略的实施,北方农牧交错带等过渡地区的生态退耕及其影响成为学术界关注的热点^[2]。

综观已有研究,生态退耕驱动机制研究大多停留在宏观层面,对于特定政策背景下过渡地区生态退耕的驱动因素分析有待继续深入,影响生态退耕时空格局的驱动因子及其交互作用分析仍鲜有报道。北方农牧交错带作为中国重要的生态屏障,是国家推行生态退耕政策的典型区域。基于此,本文以中国北方农牧交错带为例,运用退耕指数,空间自相关分析、地理探测器等方法、模型,依据区域生态退耕政策演进阶段分2000—2010年和2010—2020年两个时段,剖析2000—2020年北方农牧交错带生态退耕时空分异特征及驱动因素,旨在为北方农牧交错带生态系统结构优化与生态文明建设提供参考。

2 研究区概况

中国北方农牧交错带(Agro-pastoral ecotone of northern China, AENC)地处中国北方传统农业和畜牧业的过渡地带,其具体范围参考王静爱等^[27]的研究划定,主要包括由内蒙古高原东南部经辽西低山丘陵、冀北山地、晋陕北部地区向西延伸到甘青交界处的半农半牧区,涵盖内蒙古、吉、辽、冀、晋、陕、甘、宁、青等9省(自治区)的226县(市、区、旗),地理位置介于34°43'31"N—46°57'46"N, 100°57'11"E—

125°34'11"E之间,总面积 $6.99 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。这一地带地势由西南向东北倾斜,从平原向山地、高原过渡,地形复杂多样,以高原、山地为主,海拔高程1~4831 m(图1)。北方农牧交错带属于温带干旱、半干旱气候,气温低、干旱少雨,年平均气温0~8℃,年平均降水量300~450 mm,年降水变率较大。自然植被从东部森林草原经中部典型草原过渡到西部荒漠草原。该地生态退耕自1999年开始试点,2000年以来相继启动,实施范围涵盖长城沿线沙化退化区、黄土丘陵沟壑区、京津冀水源涵养区等重点区域。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源与处理

研究数据主要包括Landsat影像、气象与地形数据、基础地理信息数据和统计数据,其中Landsat影像包括Landsat TM影像(2000年、2010年)和Landsat TM影像(2020年),基于ArcGIS和ENVI软件运用人机交互解译方法提取耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地等土地利用类型,结合野外抽样核验和Google Earth进行数据修正和解译精度检验,得到2000年、2010年、2020年土地利用数据总体分类精度均大于87%,*Kappa*系数均超过0.85,表明准确度可满足本文研究需要^[2,29];气象数据具体包括逐年气温、逐年降水量等数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),运用ArcGIS反距离加权空间插值法得到气象栅格数据;

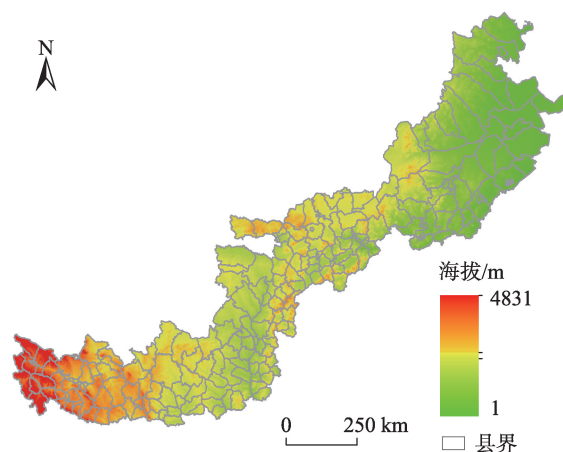


图1 中国北方农牧交错带位置示意图

Figure 1 Location of the agro-pastoral ecotone of northern China (AENC)

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1584号的标准地图制作,底图无修改。

2022年5月

地形数据以数字高程模型(DEM)为基础,下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>) ASTEM GDEM数据,运用ArcGIS软件提取坡度、坡向和地形起伏度,空间分辨率为30 m×30 m;基础地理信息数据包括北方农牧交错带行政边界和交通路网数据,来自于国家地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>);统计数据包括人口数据和地区生产总值,来自2001—2021年北方农牧交错带省(自治区)统计年鉴、社会经济统计公报和中国科学院资源环境科学和数据中心(<http://resdc.cn/>),部分缺失数据通过数据平滑处理或空间插值补全。上述数据资料经格式转换、几何校正、掩膜裁剪等处理统一转换为Albers投影。

3.2 研究方法

3.2.1 生态退耕识别与测度

(1) 土地利用转移矩阵

基于ArcGIS空间叠置方法获取2000—2020年北方农牧交错带土地类型转移矩阵,刻画2000—2020年耕地生态转型动态过程信息,表征其变化方向和变化数量。表达式为^[10,30]:

$$S_{lk} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1f} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2f} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{e1} & S_{e2} & \cdots & S_{ef} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{lk} 为土地利用类型 l 转化成类型 k 的面积, l,k 分别为转移前后的土地利用类型($l=1$ 为耕地, $k=1, 2, 3, 4$ 分别表示耕地、林地、草地、水域), e,f 为土地利用类型的数量。

(2) 退耕指数

运用退耕指数表征2000—2020年北方农牧交错带生态退耕程度。计算公式为^[5]:

$$K = \frac{\sum_{g=1}^m C_g}{C_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K 为退耕指数; C_a 表示初期耕地面积; $g=1, 2, 3, 4$ 分别表示耕地向林地、草地、水域的转换; C_g 表示某种生态退耕类型的面积,即耕地分别向林地、草地、水域转换的面积, m 表示生态退耕类型的数量。

3.2.2 生态退耕空间格局分析

运用空间自相关分析方法识别北方农牧交错带生态退耕空间集聚特征,其中全局空间自相关采用Global Moran's I 指数表征空间单元的集散效应。计算公式为^[31]:

$$I = n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X}) / \left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right] \quad (3)$$

式中: n 为研究区域空间单元数; X_i 与 X_j 分别表示单元 i,j 的生态退耕面积; \bar{X} 表示生态退耕面积的均值; W_{ij} 为空间权重矩阵。给定显著性水平时,若Global Moran's $I > 0$ 表明区域生态退耕程度空间呈现集聚态势,且数值越大空间关联性越强。采用局部空间自相关识别生态退耕程度的空间依赖性和异质性,计算公式为^[32]:

$$G_i^*(d) = \sum_{j=1}^n W_{ij} X_j / \sum_{j=1}^n X_j \quad (4)$$

式中: $G_i^*(d)$ 为空间单元 i 的统计量,将 $G_i^*(d)$ 进行标准化得到其 Z 统计检验值 $Z(G_i^*)$ 。若 $Z(G_i^*)$ 显著为正,表明生态退耕程度空间呈现高值集聚区;若 $Z(G_i^*)$ 显著为负则呈现低值集聚区。据此,将中国北方农牧交错带生态退耕程度划分为高-高集聚(HH)、高-低集聚(HL)、低-高集聚(LH)、低-低集聚(LL)4类。

3.2.3 生态退耕时空分异的影响因素分析

(1) 解释变量的选取

生态退耕时空格局的形成受多种因素的影响。参考已有研究^[28,29],结合北方农牧交错带的实际情况,基于自然、社会经济、区域政策等维度选取生态退耕时空分异的解释变量(表1)。鉴于北方农牧交错带地形复杂,水热条件空间差异显著,选取年均降水量、年均气温表征该区域的气候条件,以高程、坡度、坡向、地形起伏度等地形因子反映其地形条件,气候条件和地形条件共同构成自然因素;考虑到人口规模、经济发展水平、道路交通条件是区域社会经济发展的主要衡量指标,经济密度体现了经济发展水平,城镇化水平反映了城镇人口规模,路网密度表征交通条件。同时,区域生态政策、生态规划对生态退耕具有指导作用,综合考虑生态政策实施强度,选取生态工程数量、生态管控面积比等解释变量表征区域政策因素对生态退耕时空分异的影响。

(2) 模型选择

地理探测器广泛应用于探测地理现象空间分异性及其驱动力^[30]。本文运用地理探测器中的因子探测和交互探测模块探究北方农牧交错带生态退耕时空分异的驱动因素,计算公式为^[33,34]:

表1 生态退耕时空分异的解释变量

Table 1 Explanatory variables for the spatiotemporal differentiation of ecological restoration

驱动因素	解释变量	变量解释
自然因素	X ₁ 年均降水量	运用ArcGIS软件Kriging插值法和分区统计获取各分析单元的多年平均降水量/mm
	X ₂ 年均气温	运用ArcGIS软件Kriging插值法和分区统计获取各分析单元的多年平均气温/℃
	X ₃ 高程	基于ArcGIS分区统计获取各分析单元的DEM数据/m
	X ₄ 坡度	基于DEM数据提取坡度信息,运用ArcGIS分区统计获取各分析单元的坡度平均值/°
	X ₅ 坡向	基于DEM数据提取坡向信息,运用ArcGIS分区统计获取各分析单元的坡向
	X ₆ 地形起伏度	基于DEM数据提取地形起伏度,运用ArcGIS分区统计获取各分析单元的地形起伏度/m
社会经济因素	X ₇ 经济密度	多年平均地区生产总值/区域总面积/(亿元/km ²),统计年鉴数据
	X ₈ 城镇化水平	多年平均城镇人口/区域总人口/(人/km ²),统计年鉴数据
	X ₉ 路网密度	多年平均道路通车里程/区域总面积/(km/km ²)
政策因素	X ₁₀ 生态工程数量	将各地域单元开展的每种生态工程赋值为1,运用算数求和计算各单元的生态工程种类数
	X ₁₁ 生态管控面积比	分析单元内生态管控面积/分析单元总面积/(km ² /km ²)

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^L Nh\sigma_h^2 \tag{5}$$

式中: q 是生态退耕时空分异的决定力指标, q 的取值范围为[0, 1], q 值越大,表明驱动因子对生态退耕时空分异的影响程度越大; h 为驱动因子的分类数; N 为县域单元数; σ^2 为各空间单元生态退耕面积的方差。交互探测用于测度驱动因子之间的交互作用,包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强5种作用。

4 结果与分析

4.1 北方农牧交错带生态退耕整体特征

4.1.1 生态退耕的时序变化特征分析

基于ArcGIS空间分析模块将2000年、2010年、2020年北方农牧交错带土地利用现状图进行叠置,汇总得到2000—2020年北方农牧交错带退耕特征。

2000—2020年北方农牧交错带耕地转出与转入并存,退耕总面积为14603.34 km²,建设占用耕地面积为8785.20 km²,新增耕地面积为37236.54 km²,生态退耕总面积为27617.84 km²,占退耕总面积的75.20%(表2)。期间,北方农牧交错带年均生态退

耕面积为1380.89 km²,退耕指数为10.27%。其中,2000—2010年北方农牧交错带生态退耕面积为12804.21 km²,占退耕总面积的87.68%,年均生态退耕面积为1280.42 km²,退耕指数为4.76%。2010—2020年生态退耕面积为24526.58 km²,占退耕总面积的74.32%,年均生态退耕面积为2452.66 km²,退耕指数为9.28%。2000—2020年北方农牧交错带耕地面积先减少后增加,2010—2020年生态退耕速率高于2000—2010年生态退耕速率,表明随着退耕还林还草政策与防护林体系建设工程的继续实施,北方农牧交错带生态退耕程度日益加深。2000年以来生态文明建设受到高度重视,尤其是随着北京、张家口市联合申办2022年冬季奥运会成功,生态环境保护与绿色发展成为该区域发展的主旋律。同时,北方农牧交错带人口数量不断增长,人类活动不断挤占生态用地,表明这一时期北方农牧交错带生态退耕与建设占用耕地并存,促使该区域城镇建设、农业耕作、生态保护空间格局初步形成。

4.1.2 生态退耕的转化特征分析

北方农牧交错带生态退耕耕地主要转化为林

表2 2000—2020北方农牧交错带退耕特征

Table 2 Characteristics of restoration in the agro-pastoral ecotone of northern China (AENC), 2000-2020

研究时段	退耕总面积/km ²	建设占用耕地		生态退耕		
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	退耕指数/%
2000—2010年	14603.34	1730.73	11.85	12804.21	87.68	4.76
2010—2020年	33001.32	8115.65	24.59	24526.58	74.32	9.28
2000—2020年	36725.85	8785.20	23.92	27617.84	75.20	10.27

2022年5月

地、草地,生态退耕转化时空差异显著(图2、表3)。2000—2020年生态退耕耕地主要转化为草地,转化面积为23751.22 km²,占生态退耕总面积的86.00%,主要分布于内蒙古高原与冀北山区交界处的太仆寺旗、化德县、康保县、张北县、尚义县、武川县等区域,以及鄂尔多斯高原与黄土高原丘陵区交界处的兴县、临县、佳县、米脂县、横山县、子洲县、绥德县、柳林县、清河县、石楼县、清涧县、延川县等地区;转化为林地的面积为3240.69 km²,占生态退耕总面积

的11.73%,主要分布于冀北山区的兴隆县、凌源县、建昌县等地,以及黄土高原地区的志丹县、宜川县、吉县、乡宁县、蒲县等地;转化为水域的面积为625.99 km²,占生态退耕总面积的2.27%,主要分布于黄河上游临夏县、东乡县及永靖县交界处的河流沿线地区,永定河流域山阴县、怀仁县、大同县境内河流谷地,以及兴隆县与宽城县境内滦河干流及支流沿线地区。其中,2000—2010年北方农牧交错带生态退耕主要为耕地转化为草地,占生态退耕面积

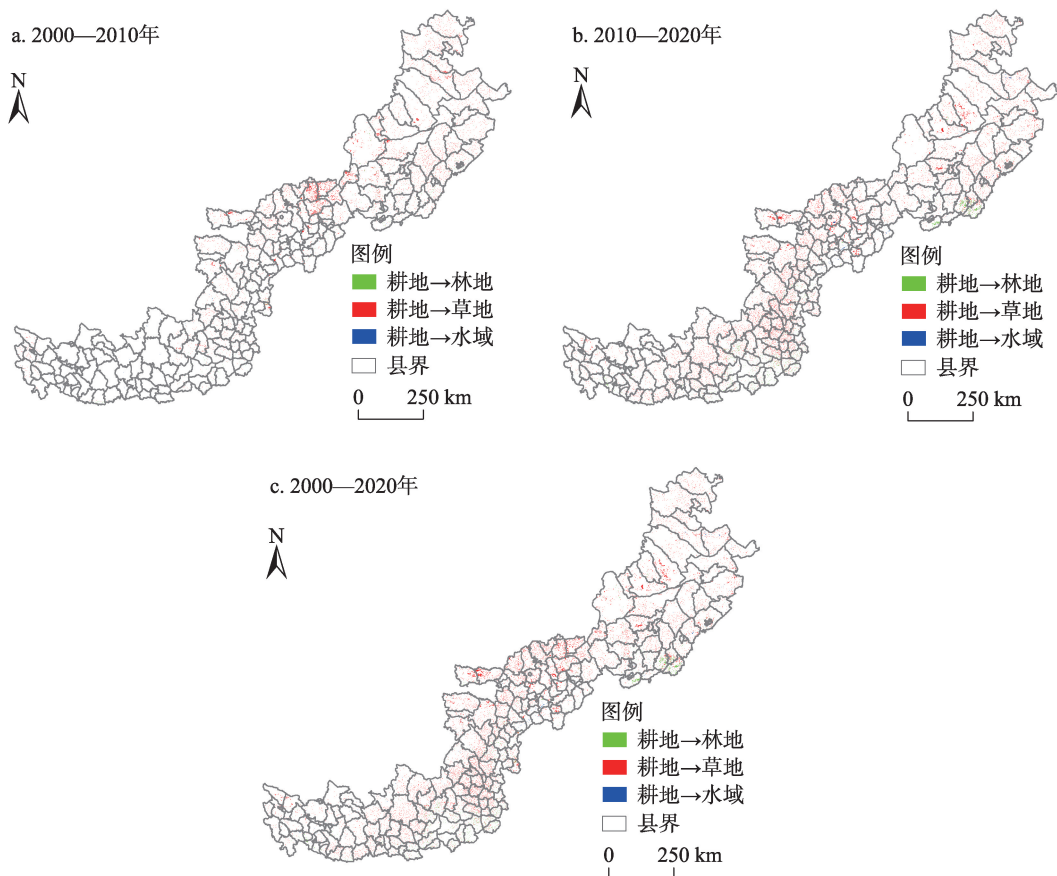


图2 2000—2020年北方农牧交错带生态退耕时空分布图

Figure 2 Spatiotemporal distribution of ecological restoration areas in the agro-pastoral ecotone of northern China (AENC), 2000-2020

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1584号的标准地图制作,底图无修改。

表3 2000—2020年北方农牧交错带各时段生态退耕耕地的转化特征

Table 3 Transformation characteristics of cultivated land in the agro-pastoral ecotone of northern China (AENC), 2000-2020

退耕类型	2000—2010年		2010—2020年		2000—2020年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地→林地	852.39	6.66	2991.23	12.20	3240.69	11.73
耕地→草地	11699.22	91.37	20878.26	85.12	23751.22	86.00
耕地→水域	252.60	1.97	657.19	2.68	625.99	2.27

的91.37%,其次是转化为林地,转化面积占生态退耕面积的6.66%;2010—2020年该区域生态退耕也是主要转为草地、林地,转换面积则分别占生态退耕面积的85.12%、12.20%。进入21世纪以来,北方农牧交错带先后开展退耕还林还草、荒山造林、风沙源治理等生态建设工程,促使耕地向林地、草地、水域转换,对农牧交错区的生态环境产生深远影响。

4.2 北方农牧交错带生态退耕空间分异特征

基于 ArcGIS 软件平台分别计算 2000—2020 年北方农牧交错带生态退耕的全局 Moran's I 指数,结果显示 2000—2010 年、2010—2020 年、2000—2020 年的 Moran's I 指数分别为 0.661、0.445、0.474,均通过显著性检验($Z > 1.96$, $P < 0.01$),表明北方农牧交错带生态退耕存在明显的空间关联性,呈现明显的趋同趋势。2000—2010 年、2010—2020 年两时段生

态退耕的 Moran's I 指数由 0.661 减小到 0.445,表明北方农牧交错带生态退耕空间集聚态势有所减弱。

运用局部空间自相关模块分别计算 2000—2020 年不同时段北方农牧交错带生态退耕的局域 G_i^* 指数,并绘制研究区生态退耕的空间集聚图(图 3)。2000—2020 年北方农牧交错带生态退耕高-高集聚区由东北向西南扩展,低-低集聚区由西部向东北转移。图 3a 显示,2000—2010 年北方农牧交错带生态退耕高-高集聚区集中分布于内蒙古东南部与吉林、辽宁、河北三省交界地区,涉及科尔沁右翼前旗、科尔沁右翼中旗、突泉县、通榆县、开鲁县、北票市、松山区、多伦县、沽源县、崇礼区、张北县等 27 个县(市、区、旗),低-低集聚区主要分布于青藏高原与黄土高原交界处河谷平原地区,包括青海东部、甘肃中部、宁夏南部的湟中县、乐都县、永登县、

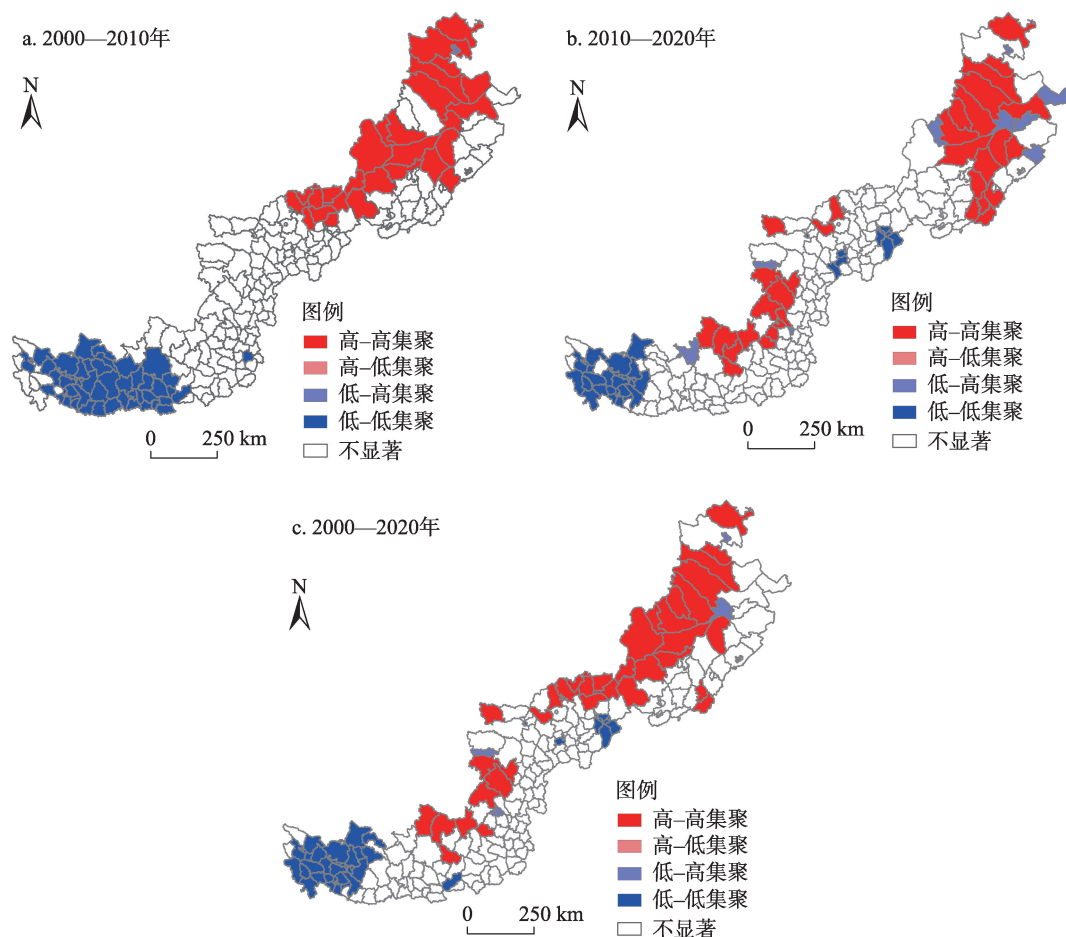


图3 2000—2020年北方农牧交错带生态退耕的LISA集聚图

Figure 3 Local indicators of spatial association (LISA) cluster map of ecological restoration areas in the agro-pastoral ecotone of northern China (AENC), 2000-2020

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1584号的标准地图制作,底图无修改。

2022年5月

红谷区、西固区、榆中县、白银区、靖远县、镇原县、宁县等48个县区,低-高集聚区分布于高-高集聚区周边区域,如内蒙古乌兰浩特市。2010—2020年生态退耕高值集聚区向西南部转移,分别于内蒙古与吉林、辽宁交界处以及内蒙古与陕西、甘肃交界地区形成两大高值集聚区,内蒙古包头市和乌兰察布市境内分布着零散的高值集聚区。低-高集聚区扩展到9个县区,零散分布于高值集聚区周边区域。低值集聚区缩小到40个县(市、区),呈现由西部向东北部扩散的趋势,在青海西宁、海南、黄南、海东及甘肃兰州、临夏交界地区形成生态退耕低值集群,河北张家口市区、山西与内蒙古省会市区及周边出现小规模的低值集聚。总体而言,研究区内生态退耕两极分化明显,且具有一定的空间稳定性。生态退耕高值区趋于山区集中特征,主要分布于大兴安岭—燕山山区、冀北山区、黄土高原低山丘陵区等地,低值区趋于省际边缘和地市辖区及其周边区域集中分布,主要分布于青海、甘肃交接地带,河北张家口市区及其周边地区存在小规模空间集聚,在庆阳市、大同市、呼和浩特市等地呈零散分布。

4.3 北方农牧交错带生态退耕时空分异驱动因素

4.3.1 驱动因子探测

运用地理探测器模型因子探测模块探究2000—2010年、2010—2020年生态退耕时空分异驱动因子的影响强度,即地理探测器的 q 值(表4)。

由表4可知,2000—2010年生态退耕空间分异驱动因子的影响强度表现为 $q_{X_{11}} > q_{X_8} > q_{X_5} >$

$q_{X_3} > q_{X_{10}} > q_{X_6} > q_{X_2} > q_{X_1} > q_{X_9} > q_{X_7} > q_4$,其中生态管控面积比起主导作用,其 q 值为0.286,通过了1%水平的显著性检验;城镇化水平、坡向、海拔高程、生态工程数量都具有较强的解释能力。表明政策因素、地形条件、人口规模对生态退耕的空间分异造成较大影响。这主要是因为,地形条件是中国北方农牧交错带生态退耕空间分异的宏观基础。城镇化水平表征了人口集聚程度,人口数量的增长能够有效刺激对粮食、蔬菜等农产品的需求水平,致使生态退耕主要发生于偏远地区。21世纪以来,国家相继出台了退耕还林还草相关政策,影响生态退耕的空间分异。生态管控面积比、生态工程数量的解释能力分列第1、5位。2010—2020年生态退耕空间分异驱动因子的影响强度表现为 $q_{X_5} > q_{X_{10}} > q_{X_3} > q_{X_{11}} > q_{X_9} > q_{X_6} > q_{X_1} > q_{X_2} > q_{X_7} > q_{X_8} > q_{X_4}$ 。该时期起主导作用的驱动因子由政策因素转变为坡向,其 q 值为0.326;其他解释能力较强的驱动因子是生态工程数量、海拔高程、生态管控面积比、路网密度和地形起伏度,均通过了1%水平的显著性检验;坡度、城镇化水平、经济密度等驱动因子的解释能力较低。表明地形条件、政策因素、交通条件在生态退耕空间分异中发挥重要作用。坡向、生态工程数量、海拔高程、年均降水量等自然、政策因子对生态退耕的空间格局影响深刻,其影响程度总体呈现增强态势。为进一步加快绿色发展,推进生态文明建设,退耕还林还草、荒山造

表4 2000—2020年北方农牧交错带生态退耕驱动因子探测结果

Table 4 Detection results of ecological restoration driving factors in the agro-pastoral ecotone of northern China (AENC), 2000-2020

探测因子	2000—2010年			2010—2020年		
	q	p	排序	q	p	排序
X_1 年均降水量	0.123**	0.000	8	0.129**	0.000	7
X_2 年均气温	0.124**	0.000	7	0.126**	0.000	8
X_3 海拔高程	0.194**	0.000	4	0.190**	0.000	3
X_4 坡度	0.057*	0.015	11	0.049*	0.028	11
X_5 坡向	0.206**	0.000	3	0.326**	0.000	1
X_6 地形起伏度	0.137**	0.000	6	0.134**	0.000	6
X_7 经济密度	0.089**	0.000	10	0.096**	0.000	9
X_8 城镇化水平	0.226**	0.000	2	0.063*	0.011	10
X_9 路网密度	0.116**	0.000	9	0.186**	0.000	5
X_{10} 生态工程数量	0.176**	0.000	5	0.305**	0.000	2
X_{11} 生态管控面积比	0.286**	0.000	1	0.189**	0.000	4

注:**表示在1%水平显著,*表示在5%水平显著。

林、生态湿地保护等生态政策与工程的持续实施,致使北方农牧交错带大量坡耕地转变为林地、草地,部分山区未利用地转变为林地,植被覆盖率不断提高,有助于保障国土空间生态修复,提升区域生态系统服务。2000—2020年坡向、海拔高程、生态工程数量、路网密度、年均降水量的影响程度不断增强,其中路网密度对生态退耕空间分异的影响程度增强最明显;生态管控面积比、城镇化水平、年均气温的影响程度有所降低,其中城镇化水平的影响程度降低最明显。

4.3.2 驱动因子交互探测

北方农牧交错带生态退耕时空分异是由自然环境、社会经济、区域政策等驱动因素共同作用的结果,运用地理探测器模型交互模块探测2000—2020年各驱动因子对生态退耕时空分异的交互作用(表5)。

因子交互探测结果(表5)表明,各驱动因子两两交互对北方农牧交错带生态退耕时空分异的影响呈现双因子增强和非线性增强效应。2000—

2010年海拔高程 \cap 路网密度、城镇化水平 \cap 生态管控面积比、年均降水量 \cap 城镇化水平、年均降水量 \cap 生态管控面积比、年均气温 \cap 城镇化水平等因子的交互作用对生态退耕空间分异的影响强度分列第1~5位,其中城镇化水平 \cap 生态管控面积比为双因子增强,其余均为非线性增强,其影响力度分别达到0.608、0.523、0.520、0.509、0.496。表明这一时期人口数量增长、城镇化发展、村村通道路工程及生态政策的推行可以增强各驱动因子对生态退耕空间分异的解释能力。尤其是退耕还林还草、天然保护林工程、荒山造林等生态保护修复措施及城镇化水平在一定程度上对生态退耕空间分异具有引导作用。2010—2020年各驱动因子对生态退耕空间分异的交互作用多为非线性增强,解释能力较强的交互因子是年均降水量 \cap 坡向(0.558)、年均气温 \cap 坡向(0.558)、年均降水量 \cap 生态工程数量(0.507)、年均气温 \cap 生态工程数量(0.484)等为非线性增强,坡向 \cap 生态管控面积比(0.511)、海拔高程 \cap 坡向(0.500)、年均降水量 \cap 生态管控面积比(0.482)、海

表5 2000—2020年驱动因子交互作用探测结果

Table 5 Interaction detection results of natural factors, 2000-2020

交互类型	2000—2010年	2010—2020年	交互类型	2000—2010年	2010—2020年	交互类型	2000—2010年	2010—2020年
$X_1 \cap X_2$	0.142*	0.146*	$X_3 \cap X_4$	0.325**	0.315**	$X_3 \cap X_9$	0.308*	0.403*
$X_1 \cap X_3$	0.317**	0.278*	$X_3 \cap X_5$	0.438**	0.500*	$X_3 \cap X_{10}$	0.278*	0.440*
$X_1 \cap X_4$	0.293**	0.306**	$X_3 \cap X_6$	0.434**	0.383**	$X_3 \cap X_{11}$	0.470*	0.511*
$X_1 \cap X_5$	0.381**	0.558**	$X_3 \cap X_7$	0.302**	0.269*	$X_6 \cap X_7$	0.316**	0.250**
$X_1 \cap X_6$	0.396**	0.438**	$X_3 \cap X_8$	0.480**	0.394**	$X_6 \cap X_8$	0.395**	0.249**
$X_1 \cap X_7$	0.271**	0.342**	$X_3 \cap X_9$	0.608**	0.438**	$X_6 \cap X_9$	0.334**	0.273*
$X_1 \cap X_8$	0.520**	0.337**	$X_3 \cap X_{10}$	0.424**	0.461*	$X_6 \cap X_{10}$	0.262*	0.400*
$X_1 \cap X_9$	0.325**	0.438**	$X_3 \cap X_{11}$	0.493**	0.428*	$X_6 \cap X_{11}$	0.443**	0.317*
$X_1 \cap X_{10}$	0.308**	0.507**	$X_4 \cap X_5$	0.309**	0.448**	$X_7 \cap X_8$	0.350**	0.232**
$X_1 \cap X_{11}$	0.509**	0.482*	$X_4 \cap X_6$	0.303**	0.256**	$X_7 \cap X_9$	0.283**	0.311**
$X_2 \cap X_3$	0.319**	0.302*	$X_4 \cap X_7$	0.195**	0.232**	$X_7 \cap X_{10}$	0.349**	0.426**
$X_2 \cap X_4$	0.312**	0.307**	$X_4 \cap X_8$	0.319**	0.167**	$X_7 \cap X_{11}$	0.392**	0.321**
$X_2 \cap X_5$	0.387**	0.558**	$X_4 \cap X_9$	0.243**	0.299**	$X_8 \cap X_9$	0.407**	0.307**
$X_2 \cap X_6$	0.388**	0.406**	$X_4 \cap X_{10}$	0.255**	0.408**	$X_8 \cap X_{10}$	0.461**	0.440**
$X_2 \cap X_7$	0.297**	0.374**	$X_4 \cap X_{11}$	0.362**	0.334**	$X_8 \cap X_{11}$	0.523*	0.273*
$X_2 \cap X_8$	0.496**	0.339**	$X_5 \cap X_6$	0.285*	0.367*	$X_9 \cap X_{10}$	0.253*	0.371*
$X_2 \cap X_9$	0.325**	0.430**	$X_5 \cap X_7$	0.362**	0.446**	$X_9 \cap X_{11}$	0.400*	0.431**
$X_2 \cap X_{10}$	0.313**	0.484**	$X_5 \cap X_8$	0.407*	0.393**	$X_{10} \cap X_{11}$	0.472**	0.424*
$X_2 \cap X_{11}$	0.425**	0.411**						

注: *代表双因子增强, **表示非线性增强。

2022年5月

拔高程、生态工程数量(0.461)等为双因子增强。总体而言,自然因素与人文因素(社会经济因素、政策因素)的交互作用是生态退耕空间分异的关键动力。2000—2020年北方农牧交错带自然因素与人文因素的交互作用呈现双因子增强和线性增强效应。城镇化水平反映了人口规模与分布对生态退耕空间分异的影响程度,路网密度可衡量区域交通设施数量,在一定程度上反映道路交通的可达性。生态工程数量与生态管控面积比反映了生态政策的宏观调控能力,各自然因子与城镇化水平、路网密度、生态工程数量、生态管控面积比的交互作用对生态退耕空间分异的影响协同增强。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文基于退耕指数模型和空间自相关分析剖析了2000—2020年北方农牧交错带生态退耕时空格局特征,运用地理探测器模型探究了其驱动因素。主要结论如下:

(1)2000—2020年北方农牧交错带生态退耕面积持续增大,2010—2020年生态退耕速率高于2000—2010年生态退耕速率。2000—2020年北方农牧交错带生态退耕面积为27617.84 km²,年均退耕面积为1380.89 km²,退耕指数为10.27%,退耕耕地主要转化为草地、林地和水域,占退耕总面积的75.20%,其中转化为草地的面积占生态退耕面积的86.00%,主要分布于内蒙古高原与冀北山区交界处以及鄂尔多斯高原与黄土高原丘陵区交界地区。

(2)2000—2020年北方农牧交错带生态退耕存在明显的空间关联性,空间集聚特征显著,大兴安岭—燕山山区、冀北山区、黄土高原低山丘陵区等地生态退耕呈现显著的高-高集聚,低-低集聚区趋于省际边缘、市区及其周边区域集中分布,主要分布于青海、甘肃交接地带。研究期内,生态退耕高值集聚区由东北向西南扩展,低值集聚区向东北部转移。

(3)2000—2020年北方农牧交错带生态退耕时空分异受自然因素、社会经济因素及政策因素的共同影响,坡向、海拔高程、生态工程数量、路网密度、年均降水量的影响程度不断增强,生态管控面积比、城镇化水平、年均气温的影响程度有所降低。2000—2010年生态管控面积比和城镇化水平对生

态退耕的影响更显著,2000—2010年坡度和生态工程数量对生态退耕的影响更显著。自然因素是影响生态退耕空间分异的根本因素,社会经济因素和政策因素是推动生态退耕时空分异的重要动力,各驱动因子交互作用对生态退耕时空分异呈现双因子增强和非线性增强效应。

根据北方农牧交错带生态退耕时空分异规律及影响因素,因地制宜统筹生态退耕,合理布局生态建设工程,有助于该区域科学推进生态系统格局优化与生态文明建设。

5.2 讨论

本文通过地理探测器辨识生态退耕时空分异的主导驱动因素,与已有研究中定性或定量分析的研究结论同异并存。杜国明等^[7]研究指出海拔高程、坡度等地形因子是影响生态退耕的重要因素,与本文结论一致。相较于已有研究^[2,7,10],年均降水量、海拔高程、坡向等自然因素以及经济密度、路网密度等社会经济因素的影响程度由弱变强,城镇化水平的影响力由强变弱。这主要是源于北方农牧交错带自然环境的复杂性、社会经济发展及人地关系的特殊性。加之国家生态安全屏障及京津冀重要水源涵养带的功能定位,在一定程度上制约了经济建设,导致经济密度、路网密度对生态退耕的影响相对较弱。地形条件与气候条件构成基础自然条件,在一定程度上反映了北方农牧交错带的宏观地理背景,对生态退耕的影响作用显著。21世纪以来,随着新型城镇化建设、村村通道路工程的开展以及京津冀协同发展,经济发展水平不断提高,经济密度与路网密度等社会经济因素对生态退耕的影响逐步增强,这与刘超等^[2]、杜国明等^[10]的研究结果相互印证。

退耕政策是影响北方农牧交错带生态退耕时空分异的重要因素,北方农牧交错带自1999年开始试点生态退耕,2000年以来相继启动退耕还林还草、京津风沙源治理、“三北”防护林四期工程(2000—2010年)与五期工程(2010—2020年)等生态建设工程,截至2020年底完成生态退耕24617.84 km²。结合生态退耕政策的演进,将研究时段划分为2000—2010年、2010—2020年两个阶段分别探究北方农牧交错带生态退耕的空间异质性及驱动因素。2000—2010年生态退耕政策的推行得到国家

政府部门的有力支持,生态管控面积比成为影响生态退耕空间格局最显著的驱动因子。区域政策因子与自然因子、社会经济因子的交互作用对生态退耕空间格局的影响呈现明显的增强效应。2010—2020年,坡向成为影响生态退耕空间格局最关键的驱动因子,生态工程数量、生态管控面积比对生态退耕空间格局的影响依然不容忽视。这一时期自然因素中气候因子与地形因子的交互作用以及自然因子与社会经济因子的交互作用对生态退耕空间格局的影响强化,表明环境背景与社会经济发展对生态退耕的影响日益深刻。

本文基于遥感影像、地形与气候数据、社会经济数据等多源数据,运用土地利用转移矩阵、生态退耕模型、空间自相关分析等方法模型分析北方农牧交错带生态退耕的时空分布特征并分析自然环境和社会经济等影响因素对生态退耕的影响。然而,本文部分内容有待进一步改进和完善,探究北方农牧交错带生态退耕时空分异的影响因素时,仅选取了人口密度、经济密度两个社会经济指标,而未考虑其他社会经济因素;区域政策因素因难以量化,仅选取了生态工程数量、生态管控面积比两个指标表征影响生态退耕时空分异的政策因素。因此,如何更加准确地剖析生态退耕的时空分异影响因素有待进一步深入探讨。在北方农牧交错带这一生态脆弱区,保护耕地红线与生态红线是重要的战略方针,是保障粮食安全与生态安全的重要基础,实施生态退耕需兼顾生态和经济效益,结合其特殊的生态环境和经济发展背景,因地制宜统筹推进生态退耕,合理布局生态建设工程。

参考文献(References):

- [1] 张佰发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 460–473. [Zhang B F, Miao C H. Spatio-temporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 460–473.]
- [2] 刘超, 霍永伟, 许月卿, 等. 生态退耕前后张家口市耕地变化及影响因素识别[J]. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1806–1820. [Liu C, Huo Y W, Xu Y Q, et al. Changes in cultivated land and influencing factors before and after the implementation of grain for green project in Zhangjiakou City[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(10): 1806–1820.]
- [3] 李慧杰, 牛香, 王兵, 等. 生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究: 以武陵山区退耕还林工程为例[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4316–4326. [Li H J, Niu X, Wang B, et al. Coupled coordination of ecosystem services and landscape patterns: Take the grain for green project in the Wuling Mountain area as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4316–4326.]
- [4] Wang Z Y, Yu Q R, Guo L. Quantifying the impact of the grain-for-green program on ecosystem health in the typical agro-pastoral ecotone: A case study in the Xilin Gol League, Inner Mongolia [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, DOI: 10.3390/ijerph17165631.
- [5] Liu Q F, Zhang Q, Yan Y Z, et al. Ecological restoration is the dominant driver of the recent reversal of desertification in the Mu Us Desert (China)[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122241.
- [6] 谷长磊, 刘琳, 邱扬, 等. 黄土丘陵区生态退耕对草本层植物多样性的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 99–103. [Gu C L, Liu L, Qiu Y, et al. Effects of ecological restoration on species diversity of herb layer in the hilly-gullied area of Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 99–103.]
- [7] 杜国明, 孙晓兵, 刘彦随, 等. 黄土高原生态退耕的时空分异特征[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(3): 355–364. [Du G M, Sun X B, Liu Y S, et al. Temporal and spatial-differentiation characteristics of ecological restoration in Loess Plateau[J]. Journal of Geoinformation Science, 2017, 19(3): 355–364.]
- [8] He J, Shi X. Detection of social-ecological drivers and impact thresholds of ecological degradation and ecological restoration in the last three decades[J]. Journal of Environmental Management, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115513.
- [9] Dong J W, Liu J Y, Shi W J. China's sloping land conversion program at the beginning of 21st century and its habitat suitability in typical region of Loess Plateau[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(1): 36–44.
- [10] 杜国明, 孙晓兵, 刘彦随. 延安市退耕对生态的影响及其人文驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 233–239. [Du G M, Sun X B, Liu Y S. Analysis of ecological restoration on ecosystem service and its human driving factors in Yan'an city[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 233–239.]
- [11] 许尔琪, 李婧昕. 干旱区水资源约束下的生态退耕空间优化及权衡分析: 以奇台县为例[J]. 地理研究, 2021, 40(3): 627–642. [Xu E Q, Liu J X. Spatial optimization of ecological cropland conversion and trade-off analysis under water resources restriction in the arid region: Taking Qitai County as a case study[J]. Geographical Research, 2021, 40(3): 627–642.]
- [12] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 174–182. [Liu M Z, Wang Y F, Pei H W. The changes of land use and carbon storage in the northern farming-pastoral ecotone under the background of returning farmland to forest (grass)[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 174–182.]
- [13] Dang X H, Gao S W, Tao R, et al. Do environmental conservation programs contribute to sustainable livelihoods? Evidence from

2022年5月

- China's grain-for-green program in northern Shaanxi Province[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137436.
- [14] Stoddard M T, Roccaforte J P, Meador A J S, et al. Ecological restoration guided by historical reference conditions can increase resilience to climate change of southwestern US Ponderosa pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119256.
- [15] Zhou Y Y, Fu D J, Lu C X, et al. Positive effects of ecological restoration policies on the vegetation dynamics in a typical ecologically vulnerable area of China[J]. *Ecological Engineering*, 2021, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.106087.
- [16] Tuten M C, Meador A S, Fulé P Z. Ecological restoration and fine-scale forest structure regulation in southwestern ponderosa pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, DOI:10.1016/j.foreco.2015.03.032.
- [17] Chen X, Yu L, Du Z R, et al. Distribution of ecological restoration projects associated with land use and land cover change in China and their ecological impacts[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153938.
- [18] Zhou J J, Zhao Y R, Huang P, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106803.
- [19] Wu Z L, Dai X H, Li B, et al. Livelihood consequences of the Grain for Green Programme across regional and household scales: A case study in the Loess Plateau[J]. *Land Use Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105746.
- [20] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林背景下北方农牧交错带土壤保持功能时空变化[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 172-178. [Liu M Z, Wang Y F, Pei H W. Spatiotemporal variations of the soil conservation in the agro-pastoral ecotone of northern China under Grain for Green Program[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 172-178.]
- [21] Dong S K, Shang Z H, Gao J X, et al. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.agee.2019.106684.
- [22] 朱青, 周自翔, 刘婷, 等. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究: 以延河流域为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(7): 2557-2570. [Zhu Q, Zhou Z X, Liu T, et al. Vegetation restoration and ecosystem soil conservation service value increment in Yanhe Watershed, Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2557-2570.]
- [23] Wang L J, Ma S, Zhao Y G, et al. Ecological restoration projects did not increase the value of all ecosystem services in Northeast China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119340.
- [24] Constant N L, Taylor P J. Restoring the forest revives our culture: Ecosystem services and values for ecological restoration across the rural-urban nexus in South Africa[J]. *Forest Policy and Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.forpol.2020.102222.
- [25] Cao Y, Li G Y, Tian Y H, et al. Linking ecosystem services trade-offs, bundles and hotspot identification with cropland management in the coastal Hangzhou Bay area of China[J]. *Land Use Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104689.
- [26] 刘忠, 李保国. 退耕还林工程实施前后黄土高原地区粮食生产时空变化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 1-8. [Liu Z, Li B G. Spatial and temporal changes in grain production before and after implementation of Grain for Green project in Loess Plateau region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 1-8.]
- [27] 王静爱, 徐霞, 刘培芳. 中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究[J]. *资源科学*, 1999, 21(5): 21-26. [Wang J A, Xu X, Liu P F. Landuse and land carrying capacity in ecotone between agriculture and animal husbandry in northern China[J]. *Resources Science*, 1999, 21(5): 21-26.]
- [28] Wang S Q, Tao Z F, Sun P L, et al. Spatiotemporal variation of forest land and its driving factors in the agropastoral ecotone of northern China[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, DOI: 10.1007/s40333-022-0001-4.
- [29] 陶泽涪, 王世清, 孙丕苓, 等. 中国北方农牧交错带耕地时空分异及驱动因素[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1):153-163. [Tao Z F, Wang S Q, Sun P L, et al. Spatio-temporal differentiation and driving factors of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1):153-163.]
- [30] 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.]
- [31] 任频频, 李保国, 黄峰. 农作物种植结构演变下的黄淮海旱作区小麦玉米生产时空格局[J]. *资源科学*, 2022, 44(3): 436-449. [Ren P P, Li B G, Huang F. Spatiotemporal patterns of wheat and maize production under the evolution of crop planting structures in the Huang-Huai-Hai dry farmland, China[J]. *Resources Sciences*, 2022, 44(3): 436-449.]
- [32] 宋永永, 薛东前, 夏四友, 等. 近40a黄河流域国土空间格局变化特征与形成机理[J]. *地理研究*, 2021, 40(5): 1445-1463. [Song Y Y, Xue D Q, Xia S Y, et al. Change characteristics and formation mechanism of the territorial spatial pattern in the Yellow River Basin from 1980 to 2018[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1445-1463.]
- [33] Polykretis C, Dimitrios D A. Spatial stratified heterogeneity of fertility and its association with socio-economic determinants using Geographical Detector: The case study of Crete Island, Greece-Science Direct[J]. *Applied Geography*, 2021, DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102384.

- [34] 吴超, 徐伟恒, 肖池伟, 等. 滇中地区典型火烧迹地恢复率动态变化及其影响因子[J]. 资源科学, 2021, 43(12): 2465–2474.
[Wu C, Xu W H, Xiao C W, et al. Dynamic change of recovery ra-

tios and influencing factors of typical post-fire burn areas in central Yunnan Province[J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2465–2474.]

Spatiotemporal differentiation characteristics and driving factors of ecological restoration in the agro–pastoral ecotone of northern China

SUN Piling^{1, 2, 3}, QU Lin¹, LIU Qingguo¹, XU Yueqing^{2, 4}, GONG Qiaoqiao^{1, 3}

(1. School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Rizhao Key Laboratory of Territory Spatial Planning and Ecological Construction, Rizhao 276826, China; 4. Key Laboratory for Agricultural Land Quality, Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China)

Abstract: Clarifying the spatiotemporal pattern and driving factors of ecological restoration is of great significance for the adjustment of ecosystem structure and the restoration of regional ecological environment in the agro-pastoral ecotone of northern China (AENC). Taking the AENC as an example, this study explored the spatiotemporal differentiation characteristics and driving factors of ecological restoration in the region during 2000–2020 with the methods of returned farmland index, GIS spatial analysis, and geographical detector model. The results show that: (1) The total area of ecological restoration was 27617.84 km² in the AENC during 2000–2020. The average annual area of ecological restoration was 1380.89 km², and the returned farmland index was 10.27%. The farmland of the AENC converted by ecological restoration mainly became grassland, forestland, and water areas, accounting for 75.20% of the total area of returned farmland. (2) From 2000 to 2020, the spatial distribution of the ecological restoration area was characterized by remarkable spatial agglomeration in the region. High-value cluster areas tended to be concentrated in mountainous areas and expanded from northeast to southwest. Low-value cluster areas tended to be agglomerated in provincial border regions and urban districts and their surrounding regions, and were shifting to the southeast. (3) The spatiotemporal differentiation of ecological restoration was influenced by natural factors, socioeconomic factors, and policy factors. The impacts of aspect, elevation, number of ecological projects, road network density, and average annual precipitation enhanced continuously, while the influence of ecological control area ratio, urbanization level, and annual average temperature on ecological restoration had weakened. The interaction of driving factors showed significant dual-factor enhancement effect and non-linear enhancement effect on the spatiotemporal differentiation of ecological restoration. Finally, this study provides some scientific references for promoting the optimization of ecosystem structure and ecological civilization construction in the AENC.

Key words: ecological restoration; spatiotemporal differentiation; driving factors; geographical detector model; agro-pastoral ecotone of northern China (AENC)