

DOI: 10.5846/stxb202002120234

卓静, 朱延年, 何慧娟, 王娟, 董金芳, 权文婷. 生态恢复工程对陕北地区生态系统格局的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8627-8637.

Zhuo J, Zhu Y N, He H J, Wang J, Dong J F, Quan W T. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8627-8637.

## 生态恢复工程对陕北地区生态系统格局的影响

卓 静<sup>1</sup>, 朱延年<sup>2,\*</sup>, 何慧娟<sup>1</sup>, 王 娟<sup>1</sup>, 董金芳<sup>1</sup>, 权文婷<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710014

<sup>2</sup> 陕西省气象科学研究所, 西安 710014

**摘要:**以生态环境脆弱的陕北地区为研究对象,利用 TM 遥感影像解译陆表生态系统的分布特征,从生态系统转移矩阵、单一生态系统动态度和综合生态系统动态度等方面探索了生态恢复工程实施 20 年来研究区生态系统的时空演变规律。同时,利用最小二乘趋势分析法和人类扰动指数分析气候条件和生态恢复工程的驱动机制。研究表明:(1)1997—2018 年陕北地区生态系统格局发生显著变化,主要表现为林木、草地的面积占比分别增加 19.34% 和 6.91%;耕地面积占比减少 22.15%;未利用地面积占比减少 5.01%;陕北地区生态系统格局已由生态恢复工程实施前的耕地占主导转化为林木占主导。(2)受退耕还林工程的影响,黄土高原丘陵沟壑区生态系统流转方向主要表现为耕地转化为林木和草地;防风固沙工程促使毛乌素沙漠区域未利用地转化为草地。(3)研究时间段内陕北地区年均气温基本无变化,年降水量显著呈增加趋势,整体向湿润化发展,适合地表植被生长和恢复。在这样的气候背景下,榆林和延安两市生态系统变化速度明显高于铜川市,说明生态恢复工程是研究区生态系统格局演变的主要驱动力,气候背景变化是辅助驱动力。

**关键词:**生态恢复工程;陕北;生态系统格局;遥感

## Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem in the Loess Plateau

ZHUO Jing<sup>1</sup>, ZHU Yannian<sup>2,\*</sup>, HE Huijuan<sup>1</sup>, WANG Juan<sup>1</sup>, DONG Jinfang<sup>1</sup>, QUAN Wenting<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crop, Xi'an 710014, China

<sup>2</sup> Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China

**Abstract:** Remote sensing shows considerable potential for ecological monitoring, ecological restoration and sustainable development. The Loess Plateau has been experiencing reforestation, reducing arable land area since the ecological restoration projects kept on increasing in the past two decades. Those projects were being developed for improvement of the degraded forest and sustainable development, which have resulted in significant changes in the ecological environment and ecological layout of the Loess Plateau. The spatio-temporal evolution of the ecosystem in the Loess Plateau was analyzed based on the TM satellite retrieved land use information. The results showed that: (1) from 1997 to 2018, significant changes have taken place in the ecosystem pattern of the Loess Plateau, mainly represented by an increase of 19.34% and 6.91% in the area of forest and grassland, a decrease of 22.15% in the arable land area, and a decrease of 5.01% in the area of unused land. Ecosystem pattern in the Loess Plateau has shifted from the cultivated land domination to forests domination. The arable land area in the Loess Plateau decreased the most, by a magnitude of 18554.54 km<sup>2</sup>, which decreases of 61%, mainly converted to forest and grasslands, 11617 km<sup>2</sup> and 11442 km<sup>2</sup> respectively. (2) During the past two decades, temperature has shown a weak decreasing trend about 0.06 °C while precipitation has shown an increasing trend about 57%, with a magnitude of 197 mm, which is suitable for reforestation and vegetation restoration. There were

基金项目:陕西省科技厅重点项目(2018ZDXM-GY-023);陕西省科技厅一般项目(2018SF-386);国家自然科学基金面上项目(41575136)

收稿日期:2020-02-12; 网络出版日期:2020-10-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yannianzhu@gmail.com

obvious regional differences in ecosystem changes in the Loess Plateau. The overall climate changes were in a direction in favor of vegetation restoration. However, the changes in the regional ecosystem pattern of the Loess Plateau were significantly different. Under such a climatic background, the changes of ecosystems in Yulin and Yan'an were considerably higher than those in Tongchuan, indicating that ecological restoration projects were the main driving for studying changes in ecosystem patterns, and climate background changes were auxiliary driving factor. (3) Affected by the ecological restoration projects, the transfer direction of the ecosystem in the hilly and gully region of the Loess Plateau mainly showed the conversion of arable land into forests and grasslands; the wind and sand fixation projects promoted the conversion of unused land in the Maowusu Desert area into grasslands. (4) The impacts of human activities on the ecosystem were reduced, from 0.08% to -16.06%, which mainly because of the conversion of farmland to forests, and windbreak and sand fixation projects have transformed sandy land into grassland. The results show that the ecological restoration projects have made a significant reduction in arable and unused land in the Loess Plateau, and that forests and grasslands have been greatly reduced. Implementation of restoration projects was the primary driving force, and climate background changes were auxiliary factors. However, this study has not addressed the quantitative assessment of the contribution of the driving factors, which were also one of the key directions for the future research. Meanwhile, it was found that in the past 10 years, two types of changes have occurred in the Maowusu desert in northern Yulin City. The development of agriculture activities will play a major role in promoting the local grain output and economic growth, but the impact of this change on the effectiveness of desert management needs to be addressed in a future study.

**Key Words:** ecological restoration project; the northern Shaanxi Province; ecosystem pattern; remote sensing images

陕北地区生态环境极端脆弱,水土流失、土壤沙化和水资源短缺等生态环境问题显著。为改善以上生态环境问题,1999年开始,各级政府针对该区域实施退耕还林、封山禁牧和天然林保护等一系列生态恢复工程,工程的实施会促使该地区陆地生态系统格局发生显著变化。因此,通过研究生态系统格局演变规律来实现客观评估陆地生态系统的恢复状况,是生态恢复有效性评估的重要环节,能够揭示生态恢复工程所取得的成效,可为工程的实施提供科学的参考。

土地是人类生存和发展的重要保障<sup>[1]</sup>,它受到自然和人文因素的综合影响<sup>[2-5]</sup>。自20世纪90年代起,土地利用/土地覆被变化(LUCC)已成为全球环境变化研究的核心问题<sup>[6]</sup>,其研究内容包括:土地覆被变化、土地利用的动力机制和土地利用/覆被变化模型等三大方面<sup>[7-9]</sup>。无论是大范围(三江源<sup>[10]</sup>、黄河三角洲<sup>[11]</sup>、福建省<sup>[12]</sup>、新疆自治区<sup>[13-14]</sup>、晋西北<sup>[15]</sup>、宁夏<sup>[16]</sup>等)还是小区域(市域<sup>[17-22]</sup>、县域<sup>[23-24]</sup>、小流域<sup>[25]</sup>等)国内学者都针对LUCC开展了系列研究工作,研究结果均表明:人口增长、经济发展以及区域政策等人为因素是土地利用格局改变的主要驱动力。陕北地区陆地生态系统的演变规律和驱动力也备受关注,国内许多学者围绕这一研究热点,以陕北地区及其局部区域为研究对象开展了大量的研究工作,已有研究表明:陕北地区受退耕还林(草)政策的影响,土地利用类型和土地景观格局发生显著变化,主要表现为耕地减少,林草增加<sup>[26-28]</sup>;降水等气候因素引起年际间波动<sup>[29]</sup>,对土地利用格局变化起到了巩固作用。神木县<sup>[30]</sup>、延河流域<sup>[31]</sup>、吴起县<sup>[32]</sup>、志丹县<sup>[33]</sup>等小区域内的林草面积增加,耕地面积减少这些土地利用结构互动变化的主要驱动力也是国家的生态修复政策,住宅和交通用地的增加是城镇化发展造成。

虽然现有研究成果对陕北地区生态系统演变有了一定深度的了解,但是也存在以下不足:一是以陕北地区为研究对象的研究成果普遍较早,最新研究结果为1990—2015年,研究的起始时间离生态恢复工程全面实施的1998年较远,结论不能充分反映出工程实施对陕北地区陆地生态系统的影响。二是现有成果中驱动力的分析内容较少,多为对气候条件和生态恢复工程实施数据的定性描述,未见对自然因素和人为因素详细分析的相关研究。三是缺乏陕北地区内部不同区域的陆表生态系统格局演变规律和驱动力研究工作。因此,本文在总结前人研究成果的基础上,以陕北地区为研究对象,在TM遥感影像基础上,从土地转移矩阵、单一土

地利用类型动态度和综合土地利用动态度等方面探索生态恢复工程实施 20 年来(1997—2018 年)陕北地区及各市陆表生态系统的演变规律。同时,利用最小二乘趋势分析法和人类扰动指数分别研究气候条件和生态恢复工程对陆地生态系统变化的驱动机制,从量化的角度客观反映生态恢复工程的成效,为相关决策部门提供准确的决策依据。

## 1 研究区概况

研究区主要为陕西北部黄土高原干旱、半干旱地区,从北到南包括榆林、延安及铜川三个地级市(图 1),共 25 个县 4 个市辖区。北与内蒙古自治区、西与甘肃省、东与山西省毗邻,南与渭南和咸阳两市相连接,面积为  $8.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占陕西省土地总面积的 41%。横跨暖温带和温带两个气候区,属干旱半干旱大陆性季风气候。地貌类型为黄土梁峁丘陵和沟谷深切的黄土塬,在风和流水等外营力作用下坡面侵蚀剧烈、沟谷发达、地面破碎,地形变化复杂。1999 年开始全面实施退耕还林、封山禁牧等一系列生态恢复工程,迄今正值 20a 之际。

## 2 研究资料和方法

### 2.1 研究资料及预处理

研究时间为 1997 年、2007 年和 2018 年,数据来源于 Landsat 5 和 Landsat 8,分辨率为 30m,数据均为植被主要生长季(5 月至 9 月)无云覆盖晴空遥感数据,数据经过辐射校正、几何精校正和拼接等预处理工作。

遵循“全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系”,在一级分类原则基础上,结合研究区生态恢复工程实际情况,将土地利用类型分为林木、草地、居民地、工矿用地、未利用地、耕地和水体等 7 大类。在野外调查样本点支持下,使用人机交互的监督分类方法完成遥感图像解译过程,最终 3 期分类结果的综合分类精度分别为 86.0%、87.3% 和 84.0%,KAPPA 系数 0.81、0.80 和 0.78,均符合分类精度要求。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 生态系统面积变化

在遥感分类解译的基础上,提取各陆表生态系统的面积和分布特征数据,通过分析不同生态系统的数量变化,掌握生态系统空间分布特征和时空演化规律。

#### 2.2.2 生态系统转移矩阵

土地利用转移矩阵可以有效的将两个时期不同生态系统之间的相互转换关系通过矩阵形式加以列出,细致的反映生态系统的变化特征和各系统之间的流向,量化各系统之间的相互转化状况。史培军<sup>[34]</sup>等提出的土地利用转移矩阵具体公式如下:

$$C_{ixj} = A_{ixj}^k \times 10 + A_{ixj}^{k+1} \quad (1)$$

式中,  $A_{ixj}^k$ 、 $A_{ixj}^{k+1}$  分别代表两期生态系统类型,  $C_{ixj}$  是  $k$  时期到  $k+1$  时期的土地利用变化矩阵。

按照公式 1,对 3 期土地利用数据叠加分析,获得 1997—2018 年陕北地区土地利用转移矩阵,分析 1997—2018 年研究区陆表生态系统的转变状况。

#### 2.2.3 生态系统动态变化测度

(1) 单一生态系统类型动态度  $K$ <sup>[35]</sup>,  $K$  可表达区域一定时间范围内某种生态系统类型数量变化幅度。公

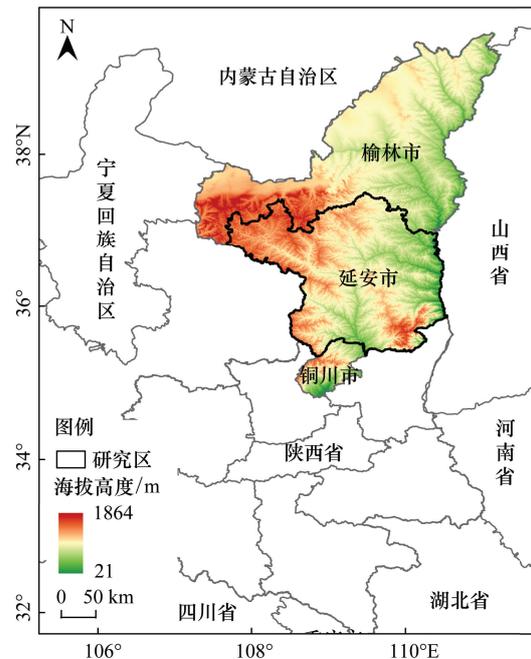


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of study area

式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $U_a$ 、 $U_b$  为研究期初及期末某一种土地利用类型的数量;  $T$  为研究时段长。当  $T$  设定为年时,  $K$  为研究时段内某一土地利用类型的年变化率。

(2) 区域综合生态系统类型动态度可描述区域土地利用变化的速度, 公式<sup>[36]</sup>表达如下:

$$LC = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $LU_i$  为监测起始时间第  $i$  类土地利用类型面积;  $\Delta LU_{i-j}$  为监测时段第  $i$  类土地利用类型转为非  $i$  类土地利用类型面积的绝对值;  $T$  为监测时段长度。当  $T$  研究时段长, 当其年为年时,  $LC$  的值就是该研究区土地利用年变化率。

(3) 生态系统类型相对变化率  $R$  是一种反映土地利用变化区域差异很好的方法, 其计算公式如下<sup>[37]</sup>。

$$R = \frac{|U_b - U_a| \times C_a}{U_a \times |C_b - C_a|} \quad (4)$$

式中,  $R$  为某一土地利用类型的相对变化率;  $U_a$ 、 $U_b$  为某区域某一特定土地利用类型研究期初及期末的面积;  $C_a$ 、 $C_b$  全研究区某一特定土地利用类型研究期初及研究期末的面积。如果  $R > 1$  表示该局部区域土地利用变化幅度大于全区土地利用变化幅度, 反之则局部区域土地利用变化幅度小于全区土地利用变化幅度。

## 2.2.4 驱动力因子分析

采用最小二乘法分析气温和降水等气象要素的年际变化趋势<sup>[38]</sup>。利用刘纪远<sup>[39]</sup>在西藏自治区土地利用现状调查中提出的土地利用程度模型, 认为人类对各种生态系统类型的利用程度不同, 人类对未利用或难利用生态系统(沙地、戈壁、盐碱地、裸土等)的扰动程度较低, 而对农田生态系统、聚落生态系统(城镇、居民地、工矿用地等)的扰动程度很高。通过人类扰动指数评价人类活动对自然生态系统的影响程度, 扰动指数值越高, 人类扰动程度越高。当一个区域人类扰动程度下降时, 认为人类对自然生态系统的威胁程度减小。将生态系统分级赋值, 由 4 级扰动程度组成, 如表 1 所示。

表 1 人类扰动指数分级表

Table 1 The classification of disturbance index

类型 Category	自然未利用地 Natural unused land	自然再生利用 Natural regeneration land	人为再生利用 Man made land for recycling	人为非再生利用 Man made non- renewable land
生态系统类型 Ecosystem type	盐碱地、沼泽地	林地、草地、湿地	耕地	人工表面
扰动分级指数 Disturbance classification index	0	1	2	3

对于某一区域来说, 常常是多种扰动级别指数的生态系统类型共存。因此, 根据不同类型所占比例进行加权求和, 形成 0—3 之间分布的生态系统综合人类扰动指数, 计算方法如下:

$$D = \frac{\left( \sum_{i=0}^3 A_i \times P_i \right)}{3} / \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

式中,  $A_i$  表示第  $i$  级生态系统扰动程度分级指数,  $P_i$  表示第  $i$  级扰动程度分级面积所占百分比,  $D$  为人类扰动指数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态系统类型变化分析

不同生态系统面积总量的变化能反应区域生态系统变化的幅度和总的态势。研究期内,研究区生态系统类型和结构均发生了明显变化(表 2,图 2),主要变现为林木和草地生态系统面积大幅增加,耕地和未利用地生态系统持续减少,研究区已由耕地生态系统占主导转变为林木生态系统主导。1997—2018 年林木面积表现为持续增加,前 10a(1997—2007)面积增加 7193.34 km<sup>2</sup>,占比增加 8.58%,后 10a(2008—2018)面积仍增加,增加 9016.11 km<sup>2</sup>,占比增加 10.76%;草地面积呈现先增加后减少的态势,占比从 25.22%增加至 33.03%,2007 年以后又小幅减少至 32.13%;耕地面积持续性减少,3 个监测年份占比分别是 36.52%、24.49%和 14.37%,共计减少 22.15%;未利用面积减少 4194.07 km<sup>2</sup>,占比从 6.84%减少至 1.83%;居民地和工矿用地占比均持续性增加,分别由 0.33%增加至 1.11%、0.15%增加至 0.4%;水体面积占比最小,呈现出持续性减少趋势,由最初的 394.03 km<sup>2</sup>减少至 280.22 km<sup>2</sup>。

表 2 陕北地区 1997—2018 年各土地利用类型面积和占比

Table 2 Area and proportion of land use in the northern Shaanxi Province from 1997 to 2018

土地类型 Landuse	1997 年		2007 年		2018 年	
	面积 Area/ km <sup>2</sup>	%	面积 Area/ km <sup>2</sup>	%	面积 Area/ km <sup>2</sup>	%
林木 Woodland and orchard	25522.09	30.47	32715.43	39.05	41731.54	49.81
草地 Grass	21125.49	25.22	27667.07	33.03	26918.12	32.13
居民地 Residential area	278.65	0.33	431.67	0.52	932.63	1.11
工矿用地 Industrial and mining land	128.80	0.15	245.62	0.29	335.15	0.40
未利用地 Unused land	5730.04	6.84	1752.78	2.09	1535.97	1.83
耕地 Farmland	30594.70	36.52	20514.10	24.49	12040.16	14.37
水体 Water	394.03	0.47	447.13	0.53	280.22	0.33

由公式 2 和公式 3 计算获取研究区陆表生态系统的  $K$  值和  $LC$  值,结果表明:1997—2007 年工矿用地的变化幅度(9.07)最高,随后依次是未利用地(-6.94)、居民地(5.49)、耕地(-3.29)、草地(3.10)、林木(2.82)和水体(1.35);2007—2018 年,居民地变化幅度位居第一(10.55),草地最小(-0.25);整个研究时段内,居民地(11.18)和工矿用地(7.63)的变化幅度位列第一和第二,随后依次是未利用地(-3.49)、林木(3.02)、耕地(-2.89)、水体(-1.38)和草地(0.19)。1997—2018 年陕北地区年均综合土地利用动态为 1.34%,前 10a 和后 11a 分别为 2.60%和 2.18%,表明研究区 2007 年之前的土地利用变化速度较 2007 年后略快,这是由于在研究时段后期不同生态系统之间的相互转化趋于平缓。

#### 3.2 生态系统类型变化方向

从 1997—2007 年和 2007—2018 年的转移矩阵可以看出(表 3、表 4),这两个时间段内,居民地、工矿用地和林木这三种生态系统面积占比持续增加,居民地均主要占用草地和耕地;工矿用地均主要占用草地;林地主要是草地和耕地转化而来。耕地和未利用持续减少,耕地主要转化为林木和草地,未利用主要转化为草地和耕地。

由图 3 和表 5 可以看出:1997—2018 年陕北地区耕地面积减少最多,减少 18554.54 km<sup>2</sup>,减幅 60.65%,主要转换为林木和草地,分别流出 11616.69 km<sup>2</sup>和 11441.57 km<sup>2</sup>;耕地转化为林木基本集中在黄土高原丘陵沟壑区,这一转变与“退耕还林”工程所采取的措施一致;耕地转化为草地主要集中在黄土高原退耕还林区 and 毛乌素沙漠南缘风沙治理区,这一转变分别于“退耕还林”工程和风沙治理工程所采取的措施相对应。未利用地面积减少次之,减少 4194.07 km<sup>2</sup>,减幅 73.19%,主要转为草地,转变区域集中在毛乌素沙漠地区,这一改变与防风固沙措施相对应。

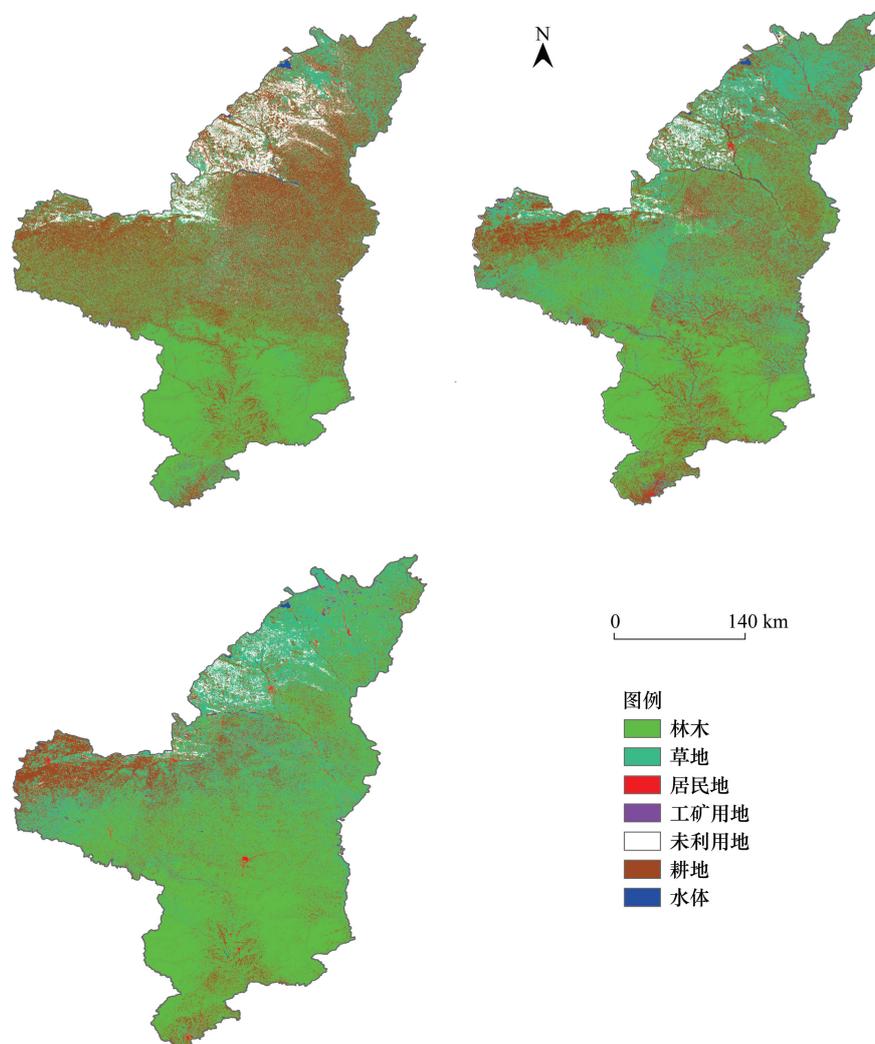


图 2 研究区不同生态系统分布图

Fig.2 Distribution Map of different ecosystems

表 3 1997—2007 年陕北地区土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transition matrix of the northern Shaanxi Province from 1997 to 2007

1997 年	2007 年						
	林木 Woodland and orchard	草地 Grass	居民地 Residential area	工矿用地 Industrial and mining land	未利用地 Unused land	耕地 Farmland	水体 Water
林木 Woodland and orchard	17410.37	4271.52	68.11	33.30	7.14	3691.39	40.25
草地 Grass	6447.18	9854.24	71.57	115.03	201.95	4375.96	59.55
居民地 Residential area	71.35	55.86	94.79	11.68	0.65	40.43	3.89
工矿用地 Industrial and mining land	35.46	48.87	6.49	14.42	0.43	16.00	7.14
未利用地 Unused land	486.94	2852.22	13.62	4.97	1351.05	1015.61	5.62
耕地 Farmland	8216.98	10525.76	174.49	54.77	190.04	11313.29	119.36
水体 Water	47.14	58.60	2.59	11.46	1.51	61.41	211.32
合计 Total	32715.43	27667.07	431.67	245.63	1752.77	20514.10	447.13
面积变化 Area change	7193.34	6541.58	153.02	116.82	-3977.26	-10080.60	53.10
增幅/% Increase/%	28.18	30.97	54.91	90.70	-69.41	-32.95	13.48

### 3.3 生态系统类型动态变化的区域差异

陕北地区从北到南分别是榆林市、延安市和铜川市。通过公式 4 计算获得 3 个市的土地利用变化率(表 6),可以看出:北部榆林市研究时段内林木、草地、居民地和工矿用地等四种生态系统类型的变化速度均高于整个研究区,其中居民地是持续性高速变化,林木和工矿用地的快速变化集中在 1997—2007 年,草地的快速变化体现在 2007—2018 年。中部延安市的居民地和工矿用地变化速度明显高于整个研究区,这两种类型生态系统的快速变化分别体现在 1997—2007 年和 2007—2018 年。南部的铜川市草地、居民地、工矿用地和水体的变化速度明显高于整个研究区;草地的快速变化集中在 2007—2018 年, $R$  值高达 18.74;居民地和水体主要是 1997—2007 年时间段内快速发展,工矿用地呈现持续性快速发展。

### 3.5 生态系统格局变化驱动力分析

#### 3.5.1 气候因素分析

陕北地区干旱少雨,水资源欠缺,地表植被的生长状况受自然因素影响较大,气温和降水中又尤以降水和气温影响最为重要。因此,分析自然因子对研究区陆表生态系统格局演变的驱动机制十分必要。1997—2018 年陕北地区年均气温基本无变化(图 4),仅降低 0.06℃,减幅 0.58%;年降水量增加 197mm,增幅 57%,呈现出波动中显著增加趋势( $P<0.01$ )(图 5);整体气候条件向湿润化转变,有利于地表植被的生长和恢复。但是,气候条件年际变化差异明显,且存在明显的阶段化差异。1997—2007 年年均气温基本无变化;年降水量呈现显著增加趋势( $P<0.01$ ),增加 210 mm,增幅 61%;2007—2018 年,年均气温和年降水量均呈现出显著增加趋势,年均气温增加 0.77℃,增幅 7.78%,年降水量增加 118mm,增幅 27.85%。

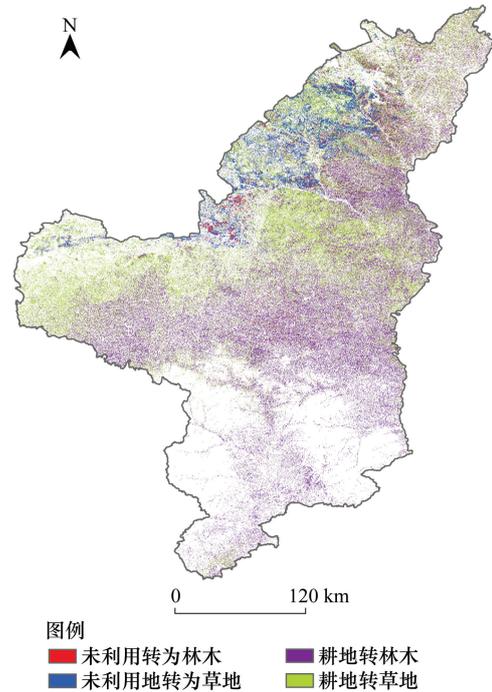


图 3 1997—2018 年部分生态系统类型转变示意图

Fig.3 The ecosystem change from 1997 to 2018

表 4 2007—2018 年陕北地区土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transition matrix of the northern Shaanxi Province from 2007 to 2018

2007 年	2018 年						
	林木 Woodland and orchard	草地 Grass	居民地 Residential area	工矿用地 Industrial and mining land	未利用地 Unused land	耕地 Farmland	水体 Water
林木 Woodland and orchard	23719.84	6193.65	157.44	43.60	80.23	2491.34	29.33
草地 Grass	10871.67	12710.60	295.57	123.72	630.55	2997.69	37.28
居民地 Residential area	78.34	99.91	122.18	50.47	1.14	77.36	2.27
工矿用地 Industrial and mining land	52.98	71.15	40.49	17.04	1.51	48.25	14.19
未利用地 Unused land	66.80	766.55	23.27	5.68	650.54	238.61	1.32
耕地 Farmland	6837.65	6983.54	254.32	89.91	170.68	6139.78	38.22
水体 Water	104.26	92.72	39.36	4.73	1.32	47.12	157.61
合计 Total	41731.54	26918.12	932.63	335.15	1535.97	12040.16	280.22
面积变化 Area change	9016.11	-748.95	500.96	89.52	-216.80	-8473.94	-166.90
增幅/% Increase/%	27.56	-2.71	116.05	36.45	-12.37	-41.31	-37.33

表 5 1997—2018 年陕北地区土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transition matrix of the northern Shaanxi Province from 1997 to 2018

1997 年	2018 年						
	林木 Woodland and orchard	草地 Grass	居民地 Residential area	工矿用地 Industrial and mining land	未利用地 Unused land	耕地 Farmland	水体 Water
林木 Woodland and orchard	19788.66	3357.33	176.01	33.73	27.46	2105.82	33.08
草地 Grass	9378.69	8720.17	233.96	134.49	240.14	2372.20	45.84
居民地 Residential area	100.11	100.54	50.75	1.51	0.00	22.49	3.24
工矿用地 Industrial and mining land	51.25	44.11	12.11	7.93	0.00	9.73	3.68
未利用地 Unused land	707.92	3184.35	80.00	35.53	1038.43	679.48	4.32
耕地 Farmland	11616.69	11441.57	344.77	119.79	229.08	6800.86	41.95
水体 Water	88.22	70.06	35.03	2.16	0.86	49.58	148.11
合计 Total	41731.54	26918.12	932.63	335.15	1535.97	12040.16	280.22
面积变化 Area change	16209.46	5792.63	653.98	206.35	-4194.07	-18554.54	-113.80
增幅/% Increase/%	63.51	27.42	234.69	160.21	-73.19	-60.65	-28.88

表 6 不同地区土地利用动态变化/%

Table 6 Dynamic degree of land use at different region in the study area

土地类型 Land type	1997—2007			2007—2018			1997—2018		
	榆林	延安	铜川	榆林	延安	铜川	榆林	延安	铜川
林木 Woodland and orchard	3.96	0.51	0.19	0.97	0.98	1.31	4.33	1.17	0.74
草地 Grass	1.39	0.63	1.74	4.57	12.40	18.74	2.82	0.96	3.59
居民地 Residential area	0.49	1.05	5.44	1.47	0.63	0.02	3.94	2.32	2.45
工矿用地 Industrial and mining land	1.42	1.48	1.64	0.52	13.24	2.62	2.13	4.95	5.27
未利用地 Unused land	0.99	1.30	0.00	0.92	7.34	0.00	0.26	0.36	0.00
耕地 Farmland	1.01	1.20	1.98	0.88	1.25	0.97	0.37	0.46	0.00
水体 Water	0.73	1.50	12.90	1.00	1.09	0.07	0.75	0.72	3.66

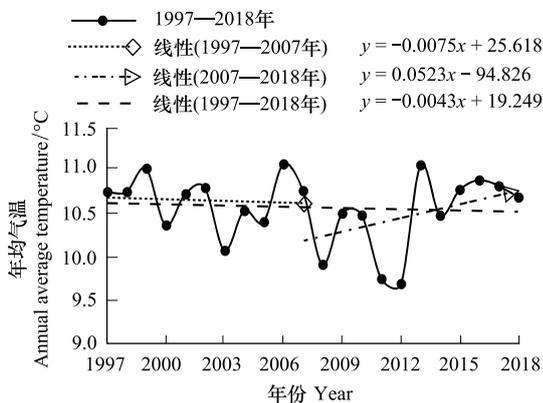


图 4 陕北地区年均气温

Fig.4 Average annual temperature in northern Shaanxi Province

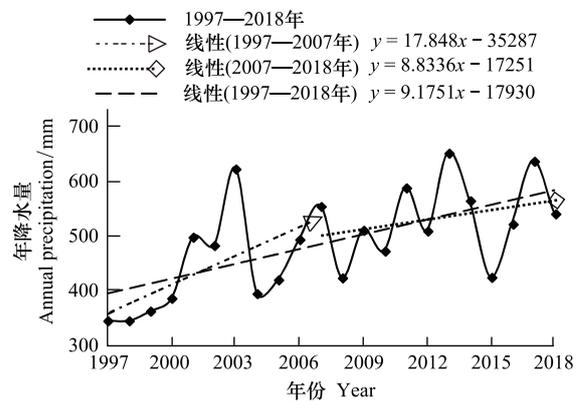


图 5 陕北地区年降水量

Fig.5 Annual rainfall in northern Shaanxi Province

研究区内气候背景变化也存在着较明显的地域间差异。研究区北部的榆林市和中部的延安市气候背景变化基本一致,1997—2018 年年均气温基本无变化,年降水量分别呈现极显著( $P < 0.001$ )和显著( $P < 0.01$ )增加趋势,气候呈现湿润化;其中 1997—2007 年两市年均气温基本无变化,榆林市年降水量增加趋势仍不显著性,延安市年降水量显著增加( $P < 0.01$ );2007—2018 年榆林和延安两市的年均气温和年降水量增加趋势均未

通过显著性检验。因此,总体来看榆林和延安两市不管在哪个时间段内气候条件均有利于植被生长和恢复。

南部的铜川市 1997—2018 年和 1997—2007 年两个时间段内年均气温和年降水量均呈现不显著增加趋势;2007—2018 年年均气温呈现显著增加趋势,年降水量呈现不显著减少趋势;因此,铜川市整体气候条件也有利于植被生长和恢复,但与榆林和延安两市比较,气候条件略差。

### 3.5.2 人类活动扰动程度分析

1997—2018 年陕北地区整体人类扰动程度呈现降低趋势(表 7),人类活动扰动程度变化量和变化率分别为-0.08 和-16.06%,造成人类扰动指数降低的主要原因是扰动级别较高的耕地转换成扰动程度较低的草地和林木,同时生态恢复工程实施前 10a 和后 11a,人类活动扰动一直在持续性降低。

北部的榆林市和中部的延安市是退耕还林、防风治沙等生态恢复工程实施的重点区域,两市林木和草地面积大幅增加,耕地面积减少明显,生态恢复工程促使两市 1997—2018 年人类活动扰动指数均呈现降低趋势,其中 1997—2008 年变化量和变化率均大于 2007—2018 年,这是由于研究前期主要以生态系统之间的相互转化为主,后期生态系统之间相互转化减少,主要以对前期转化成效的巩固为主。

南部的铜川市 1997—2018 年人类活动扰动指数呈现增加趋势,增加主要集中在 1997—2007 年这一时段,2007—2018 年人类扰动指数有所减少。究其原因,研究前期工矿用地和居民地增速快造成人类扰动指数增加;后期草地和林木这两类人类扰动级别低的类型增速较高,成功促使人类扰动指数降低。

表 7 1997—2018 年陕北地区人类扰动指数变化表

Table 7 The change of disturbance index in northern Shaanxi Province from 1997 to 2018

地区 Region	1997—2018 年	1997—2007 年	2007—2018 年	地区 Region	1997—2018 年	1997—2007 年	2007—2018 年
陕北	-0.08	-0.05	-0.03	延安	-0.06	-0.04	-0.03
榆林	-0.10	-0.07	-0.03	铜川	0.01	0.05	-0.04

综上所述,陕北地区从北到南气候变化虽然存在一定差异,但是总体均向有利于地表植被生长和恢复的方向变化,但是陕北地区不同区域的生态系统格局变化却存在显著差别,说明生态恢复工程的实施才是陕北地区生态系统格局变化的主要驱动力,气候变化只是辅助驱动力,起到了促进作用。

## 4 讨论和结论

### 4.1 讨论

本文的研究结果表明:生态恢复工程促使研究区的耕地和未利用地大幅减少,林木和草地大幅增加,工程实施是主要驱动力,气候变化是辅助驱动力,这一研究结果和现有研究结论一致。但是本文并未实现驱动因子各自贡献率的定量化评估,这也是今后研究工作的重点方向。同时,在本研究过程中,发现近 10 年来,在北部榆林市的毛乌素沙漠地区出现了两类变化现象,一是已经被治理恢复成草地的沙地又被大型农场建设转化为耕地,大型农业的发展对当地的粮食产量和经济发展会起到一定促进作用,但是这一改变会对沙漠治理已取得的成效产生多大的影响有待进一步深入研究。而且,对于该区域而言,大型农场带来的经济效益和治沙取的生态效益哪个更有利于当地的发展,哪个更为重要都值得研究和商榷。另外,陆表生态系统格局的变化会促使生态质量和生态服务价值发生一定程度的改变,本文由于篇幅限制,生态系统格局变化引起的生态服务价值和生态质量变化将另行研究加以论述。最后,本文使用的遥感图像空间分辨率为 30m,这一因素限制了生态系统空间分布数据的解译精度,在各生态系统转移矩阵中,会出现一些不合乎常理的转化方向,这一问题,随着未来高精度遥感图像的使用将得到很大程度的改善。

### 4.2 结论

本文利用 TM 遥感影像解译研究区陆表生态系统分布特征,并分别从生态系统转移矩阵、单一生态系统动态度和综合生态系统动态度等方面探索了生态恢复工程实施 20 年来研究区生态系统的时空演变规律,并分析了变化的驱动机制,得到以下结论:

(1)1997—2018 年陕北地区陆表生态系统格局变化的根本原因是退耕还林、防风治沙以及封山禁牧等生态恢复工程的实施。退耕还林草工程促使黄土高原丘陵沟壑区的耕地向林木和草地的转化;防风固沙工程促使研究区北部的毛乌素沙漠区域的未利用地向草地转化。扰动级别较高的耕地转换为扰动程度较低的草地和林木,促使人类扰动指数降低。气候条件整体向湿润化变化,有利于植被的生长和恢复。因此,气候变化对地表生态系统格局变化起到促进作用。值得关注的是,2007—2018 年毛乌素沙漠区域建立了很多大型集中式农场,使局部地区草地转化成了耕地。

(2)陕北地区生态系统变化的区域差异显著。榆林市林木、草地、居民地和工矿用地变化快于整个研究区,延安市林木、居民地和工矿用地变化速度快于研究区,铜川市草地、居民地和工矿用地变化速度快于研究区。三个市的气候条件整体有利于植被生长和恢复,但三市相比较,铜川市的气候条件略差。研究区生态系统区域间变化差异也说明生态恢复工程的实施才是陕北地区生态系统格局发生的主导因素,气候背景只是辅助因素。

文章分析了生态恢复工程实施前后陕北地区陆表生态系统格局的时空演变规律,客观评估了工程实施在研究区生态系统格局演变过程中的驱动机制,研究结论在及时和准确的反映工程成效的同时,也发现了工程实施过程中存在的问题,研究结论可以为生态恢复工程的成效评估和未来规划提供科学的数据和参考。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 周云凯,白秀玲,姜加虎. 1989 年至 2006 年鄱阳湖区土地利用动态变化研究. 资源科学, 2011, 33(6): 1186-1194.
- [ 2 ] 张丽,杨国范,刘吉平. 1986—2012 年抚顺市土地利用动态变化及热点分析. 地理科学, 2014, 34(2): 185-191.
- [ 3 ] 马礼,苏海霞. 河北涪源县土地利用动态变化研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 131-136.
- [ 4 ] 祁元,王一谋,冯毓芬,王建华,颜长珍. 基于 RS、GIS 的宁夏土地利用动态变化分析. 干旱区地理, 2002, 25(3): 245-250.
- [ 5 ] 王治良,路春燕. 呼伦贝尔草原区土地利用及景观格局变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 91-97.
- [ 6 ] 朱占永,郭伟志,张海力. 海河流域土地利用变化图谱分析. 安徽农业科学, 2012, 40(14): 8292-8295, 8314-8314.
- [ 7 ] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths, 2003.
- [ 8 ] Lambin E F, Geist H J. Land-use and land-cover change: local processes and global impacts[M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [ 9 ] Lambin E, Veldkamp A. Key findings of LUCC on its research questions[J]. Global Change Newsletter, 2005, 63: 12-14.
- [ 10 ] 刘吉平,赵丹丹,田学智,赵亮,刘家福. 1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力. 生态学报, 2014, 34(12): 3234-3244.
- [ 11 ] 王薇,王昕,黄乾,孙力. 黄河三角洲土地利用时空变化及驱动力研究. 中国农学通报, 2014, 30(32): 172-177.
- [ 12 ] 吴琛璐,王强,董政,陈文惠. 福建省海岸带土地利用/覆盖变化及其驱动力. 水土保持通报, 2018, 38(3): 318-323.
- [ 13 ] 张良侠,吴世新,穆桂金,黄凤. 基于土地利用变化的近 18a 新疆沙地动态及其驱动力分析. 中国沙漠, 2012, 32(1): 17-23.
- [ 14 ] 汉瑞英,赵志平,肖能文,史娜娜,李俊生. 2000—2015 年新疆南部地区土地利用/覆被变化及其驱动力分析. 科技通报, 2020, 36(2): 24-31.
- [ 15 ] 李秀芬,刘利民,齐鑫,张金鑫,肇同斌,王一,刘雪峰,周永斌. 晋西北生态脆弱区土地利用动态变化及驱动力. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2959-2967.
- [ 16 ] 幸赞品,颜长珍,冯坤,谢家丽,钱大文. 1975—2015 年宁夏生态系统格局宏观变化分析. 生态学报, 2018, 38(22): 7912-7920.
- [ 17 ] 佟光臣,林杰,陈杭,顾哲衍,唐鹏,张金池. 1986—2013 年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析. 水土保持研究, 2017, 24(2): 242-245.
- [ 18 ] 陈磊,孙佳新,姜海,唐华. 南京市土地利用结构时空格局及驱动因素. 水土保持研究, 2020, 27(1): 197-206.
- [ 19 ] 刘康,李月娥,吴群,沈键芬. 基于 Probit 回归模型的经济发达地区土地利用变化驱动力分析——以南京市为例. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2131-2138.
- [ 20 ] 林柳璇,尤添革,刘金福,陈远丽,黄嘉航,旷开金,路春燕. 1985—2015 年厦门市土地利用变化及驱动力. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2019, 48(1): 103-110.
- [ 21 ] 陈铸,傅伟聪,黄钰麟,阙晨曦,郑祈全,董建文. 福州市土地利用景观格局变化及驱动力研究. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2020, 45(1): 99-107.
- [ 22 ] 李露露,曹玉红,缙季良. 基于 GIS 的安庆市土地利用动态变化及其驱动力分析. 安徽农业科学, 2016, 44(5): 305-308.
- [ 23 ] 秦富仓,周佳宁,刘佳,张连根,高岭. 内蒙古多伦县土地利用动态变化及驱动力. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 31-37.

- [24] 王玲,米文宝,王鑫,陈晓珍. 限制开发生态区土地利用变化驱动力分析——以宁夏西吉县为例. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 51-57.
- [25] 刘德林,郝仕龙,李壁成. 黄土高原上黄小流域土地利用动态变化及驱动力分析. 水土保持通报, 2012, 32(3): 211-216.
- [26] 鲁亚楠,姚顺波,邓元杰,丁振民,侯孟阳,郑雪,李雅男. 陕北地区土地利用及景观格局变化对生态服务价值的影响——基于退耕还林(草)背景. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 180-192.
- [27] 宋富强,康慕谊,段锦. 陕北地区退耕前后土地利用/覆被变化及驱动力分析. 北京师范大学学报:自然科学版, 2011, 47(6): 634-639.
- [28] 肖兴媛,孟丽华,韩美莲,田雨. 陕北黄土高原土地利用变化的驱动力分析. 山东科技大学学报:自然科学版, 2005, 24(2): 38-41.
- [29] 宁佳,邵全琴. 黄土高原土地利用及生态系统服务时空变化特征研究. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 774-785.
- [30] 王晓峰,任志远. 风沙过渡区土地利用变化及驱动力分析——以陕北神木县为例. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2004, 32(1): 106-110.
- [31] 娄和震,杨胜天,周秋文,罗娅,侯立鹏. 延河流域2000—2010年土地利用/覆盖变化及驱动力分析. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 15-21.
- [32] 李登科,卓静,孙智辉. 基于RS和GIS的退耕还林生态建设工程成效监测. 农业工程学报, 2008, 24(12): 120-126.
- [33] 赵益祯,曹建农,张晓栋,何高波. 陕北黄土高原生态脆弱地区土地利用变化的时空分析——以志丹县为例. 云南大学学报:自然科学版, 2020, 42(2): 299-307.
- [34] 史培军. 土地利用/覆盖变化与生态安全响应机制. 北京:科学出版社, 2004.
- [35] Oburger E, Jones D L. Substrate mineralization studies in the laboratory show different microbial C partitioning dynamics than in the field. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(9): 1951-1956.
- [36] 石转弟,彭培好,王玉宽,傅斌,陈颖锋,何小玲. 成都市主城区土地利用变化分析. 国土资源科技管理, 2014, 31(2): 1-7.
- [37] 刘建飞,杨勤科,梁伟,任宗萍,胡志瑞. 近30年来陕北黄土高原土地利用动态变化分析. 水土保持研究, 2009, 16(2): 112-116.
- [38] 黄麟,曹巍,巩国丽,赵国松. 2000—2010年中国三北地区生态系统时空变化特征. 生态学报, 2016, 36(1): 107-117.
- [39] 刘纪远,楚玉山. 西藏自治区土地利用. 北京:科学出版社, 1992.