

基于 RS 和 GIS 的陕西省洛川县土地利用类型和植被覆盖变化特征

方月^{1,2}, 王云强^{1,2*}, 宋怡¹

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:明确土地利用类型转变和植被覆盖度变化的范围、幅度和归因是评估生态工程环境效应的前提。然而,在黄土高原塬区县域尺度类似的研究鲜有报道。基于长时间序列 NDVI 数据和 Landsat 系列卫星数据,探究黄土高原洛川县土地利用和植被覆盖度的变化状况。结果表明:退耕还林(草)工程实施以来,洛川县植被覆盖度从 0.6 (2000 年)增至 0.9 (2020 年),耕地面积减少了 481.8 km²,其中 231.3 km² 为坡度 ≤ 15° 的适耕区转为苹果园。由于坡耕地还林草的面积在洛川县土地变化总面积中仅占 1.5%,远小于其他地类改种苹果的面积(占 20.0%),因此,洛川县植被覆盖度的提升主要是政府大力推广苹果树种植的结果。研究结果可为黄土高原经济林建设提供基础数据和科学参考。

关键词:土地利用;植被覆盖;苹果园;退耕还林(草);洛川县

Characteristics of land-use types and vegetation cover changes in Luochuan County of Shaanxi Province based on RS and GIS

FANG Yue^{1,2}, WANG Yunqiang^{1,2*}, SONG Yi¹

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Background, aim, and scope Vegetation change reflects regional environmental conditions to a large extent, and land use change is the specific manifestation of human activities on natural ecosystems. To assess ecological environmental effects, we need to clarify the scope, magnitude and attribution of changes in land-use types and vegetation cover. However, similar studies at the county level on the Loess Plateau have been rarely reported. Remote sensing can be used to quickly evaluate the effectiveness of economic policies and ecological environmental governance. For the sustainable development of ecosystems, it helps to study spatiotemporal changes in vegetation and land use types and their responses to human activities. **Materials and methods** To understand the ecological effects of planting economic forests under the Grain for Green Project, we analyzed the regional land use and vegetation changes in Luochuan County, Shaanxi Province, using long-term data series of the normalized difference vegetation index (NDVI) and land use. **Results** The results showed that the

收稿日期: 2022-03-18; 录用日期: 2022-08-23; 网络出版: 2022-09-12

Received Date: 2022-03-18; Accepted Date: 2022-08-23; Online first: 2022-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971045)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41971045)

通信作者: 王云强, E-mail: wangyq@ieecas.cn

Corresponding Author: WANG Yunqiang, E-mail: wangyq@ieecas.cn

引用格式: 方月, 王云强, 宋怡. 2024. 基于 RS 和 GIS 的陕西省洛川县土地利用类型和植被覆盖变化特征[J]. 地球环境学报, 15(1): 118–128.

Citation: Fang Y, Wang Y Q, Song Y. 2024. Characteristics of land-use types and vegetation cover changes in Luochuan County of Shaanxi Province based on RS and GIS [J]. *Journal of Earth Environment*, 15(1): 118–128.

vegetation coverage increased from 0.6 (2000) to 0.9 (2020) in the study area. By 2020, the area of croplands had decreased by 481.8 km², which included 231.3 km² croplands with slopes of $\leq 15^\circ$ that were converted to apple orchards in response to local government promotion. The area of forest converted from sloping croplands (accounts for 1.5% of the total area) was much smaller than the increasing area of apple orchards (accounted for 20.0% of the total area). **Discussion** In this study, the vegetation cover increased the most in the early stage of ecological project, and the land transfer status showed that the forest area in the study area did not change much, and the increase in the apple orchard area was mainly due to the transformation of grasslands. Thanks to the popularization of apple planting in a large area of Luochuan County, the vegetation coverage has been improved in a large area, which not only accelerates economic development but also strengthens environmental protection and improvement. As the local government has vigorously supported and promoted the transformation of agricultural land into apple orchards, the local economy has greatly developed. The economic benefits and the increase in vegetation coverage induced by land use change in Luochuan County are the results of both the regional vegetation restoration and characteristic economic demand. The results of this study can provide basic data and a scientific reference for planting economic forests on the Loess Plateau. The development model of this area will help to clarify the relationship between socioeconomic development and ecological environmental protection. **Conclusions** During the ecological project, the vegetation coverage of Luochuan County significantly increased. The areas of vegetation improvement were concentrated in western and northern of Luochuan County, and the main vegetation cover change in these areas was the conversion of cultivated land into apple orchards and forests. From 2000 to 2020, the land use changes in Luochuan County were mainly manifested as the development of apple orchards in suitable arable areas, the conversion of sloping grasslands into apple orchards, and the restoration of sloping farmlands into forests and grass. The main vegetation cover structure was greater in the forests than in apple orchards or grasslands. Our results indicated that the increase in vegetation coverage in Luochuan County was mainly caused by the vigorous promotion of apple tree planting. **Recommendations and perspectives** In future vegetation restoration on the Loess Plateau, the ecological benefits of different vegetation types at the typical county scale should be further studied, and quantitative analysis should include climate and other factors to formulate corresponding ecological restoration plans and strategies and realize the coordinated development of the economy and environment.

Key words: land use; vegetation coverage; apple orchard; Grain for Green Project; Luochuan County

随着气候变化和人类活动的加剧,生态环境变化已成为人们最为关注的热点问题。植被变化在很大程度上反映了区域的环境状况,是评价生态环境质量的重要参数。无论是区域尺度还是全球尺度,人类活动对植被的影响已成为生态环境保护不可忽视的重要内容(郭永强等, 2019)。土地利用变化作为人类活动对自然生态系统影响的具体表征,直接影响地表辐射、陆地生态系统碳循环及区域生态环境与气候条件(Rindfuss et al., 2004; Mooney et al., 2013)。不合理的土地利用会造成下垫面特征的改变,包括地表反射率增高、土地沙化、水土流失、荒漠化等一系列生态问题(DeFries et al., 2002)。退化土地的植被恢复,将在地区和国家尺度产生深远的环境及

社会经济影响(Uchida et al., 2005)。因此,研究植被和土地利用类型的时空变化规律及其对人类活动的响应,有助于生态系统的可持续发展。

黄土高原是我国水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区之一(Shi and Shao, 2000)。为减缓水土流失,改善生态环境(傅伯杰等, 2009),黄土高原自1999年开始实施退耕还林(草)工程,人工林面积逐年增加,植被覆盖度显著提高(Chen et al., 2015)。目前,黄土高原区域内有关植被恢复的研究主要集中于人工林增绿幅度显著的丘陵区域,例如丘陵区坡耕地植被覆盖(孙智辉等, 2010; 王建邦等, 2019; 赵明伟等, 2019; 邓元杰等, 2020)、景观格局(陈学渊等, 2021)、植被恢复潜力变化(高海东等, 2017)等。区域

内已有的相关研究通过分析植被覆盖的整体变化来宏观探索环境脆弱地区的生态效果,但是县域尺度的土地利用转化及植被覆盖变化方向的研究仍相对较少。此外,黄土高原目前拥有世界上最大的苹果种植区,截至 2019 年,区域内苹果园面积超过了 120 万 hm^2 (Song et al., 2020)。该区域内的黄土塬区作为苹果种植的主要区域,与区域经济息息相关,但是退耕还林(草)工程背景下黄土塬区县域尺度苹果林面积演化历史的研究鲜有报道。

鉴于此,选择黄土高原典型黄土塬区内,最早引进苹果种植(1947 年)的陕西省洛川县作为研究区,基于 Landsat 系列卫星数据与 MODIS-NDVI 时序数据,系统分析洛川县 2000 年以来的土地利用转化与相应植被覆盖变化的范围、幅度和原因,以期为该区域植被管理与经济林建设提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

洛川县位于陕西省延安市南部($35^{\circ}26'29''$ — $36^{\circ}04'12''\text{N}$ 、 $109^{\circ}13'14''$ — $109^{\circ}45'47''\text{E}$),海拔 610—1515 m (图 1),属于典型的黄土塬区,黄土厚度达 80—220 m。该区域气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均温为 9.9°C ,昼夜温差大,利于光合物质的积累和运转,使该地区成为世界上最佳的苹果优生区之一(王延平等, 2012)。区内年均降水量为 592.6 mm (主要发生在 6—9 月),降雨年内变异大,属于典型的雨养农业区。洛川县是全国唯一的优势农产品(苹果)产业化建设示范县,是陕西省和全国重要的苹果生产基地,到 2010 年左右,洛川县苹果种植面积达到 333.33 km^2 (张茂等, 2021)。苹果园主要分布在黄土塬上,无灌溉条件,以旱作果园为主。作为国家首批退耕还林试点地区,洛川县已于 2001 年全面实施退耕还林(草)生态建设工程。

1.2 数据来源与预处理

使用 2000—2020 年的 4 景 Landsat 系列卫星影像(空间分辨率为 30 m,数据获取时间分别为 2000 年 6 月(ETM+)、2005 年 6 月(TM)、2010 年 5 月(ETM+)和 2020 年 4 月(OLI_TIRS));

数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),并对影像进行辐射校正、大气校正等预处理,同时选取 Google Earth 高分辨率影像作为训练数据和精度检验的数据源(影像获取时间为 2021 年 9 月)。归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为植被活动和生产力的代表性指示因子,已被广泛用于植被生长、荒漠化和生态环境质量评估等方面。使用的 2000—2020 年 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 数据集来自美国 LPDAAC (Land Process Distributed Active Archive Center) 提供的 16 d 最大值合成的植被指数 MOD13Q1 级数据产品(<https://lpdaac.usgs.gov>),空间分辨率为 250 m,该数据已经过辐射校正、几何校正和大气校正。在此基础上,通过年最大化合成,获得逐年最大化 NDVI (MNDVI) 数据。地形数据来自 NASA 提供的 ASTER GDEM V3 数字高程数据库(<https://lpdaac.usgs.gov>),通过地形分析,获得 30 m 分辨率的坡度数据。

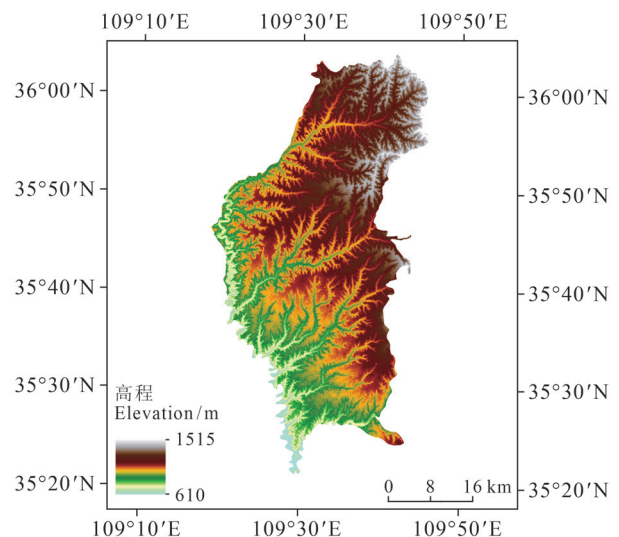


图 1 研究区位置及地形

Fig. 1 Location and topography of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 遥感解译

以《GB/T 21010—2017, 土地利用现状分类》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2017)为土地利用分类标准,结合研究区的地形特征和研究目标,将研究区的土地利用类型划分为耕地、林地、草地、

苹果园、水域、建设用地和未利用地 7 大类。根据实地调查,对研究区 2000 年、2005 年、2010 年和 2020 年 4 期遥感影像进行分类,将 2020 年定为基准影像,通过在 Google Earth 高分辨率影像上选取各个类别的纯像元地类作为训练样本,对 2020 年影像进行土地利用信息的提取,并采用假彩色合成图像将研究区划分为耕地、草地、林地、水域、建设用地和未利用地 6 种类型。为进一步准确地提取苹果园信息,通过 2021 年 5 月的洛川县野外实测,获取 10 个苹果园样点位置信息及部分果园基本情况,其中包括种植时间、土地利用历史等,结合 Google Earth 影像判读,对 2020 年洛川县苹果园分布进行判别,并采用支持向量机方法进行监督分类,在统一的人工判读解译标准下,经过目视解译,根据 2020 年影像分类中的光谱特征和几何特征对 2000 年、2005 年和 2010 年影像进行监督分类,进而得到 2000 年和 2020 年 2 期土地利用分布图。运用 Google Earth 数据对 2020 年分类结果进行精度检验, Kappa 系数为 0.9911。

1.3.2 土地利用变化动态分析

土地利用转移矩阵可以反映研究时段内各土地利用类型的格局特征和时空演变过程转移变化情况,以便分析研究时段初期各类型土地的流向以及末期各土地利用类型的来源与构成,其公式如下(朱会义和李秀彬, 2003):

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为研究时间段内第 i 类土地利用向第 j 类土地利用转移的面积; n 为土地利用类型总数量。

1.3.3 NDVI 时序变化趋势分析

NDVI 的取值范围为 -1.0—1.0, 与植被覆盖度呈正相关, NDVI < 0.1 时表示地表无植被覆盖, 如裸土、沙漠、水体、冰雪和云等 (Stow et al., 2003), 随着植被绿度水平的增加, NDVI 从 0.1 增至 1.0。本文通过一元线性回归分析方法研究 NDVI 在时间尺度的变化趋势和强度: 利用一元线性回归方程的斜率 (slope) 来反映每个栅格像元 NDVI 的变化趋势特征。趋势分析法主要采用最小二乘法逐像元拟合, 通过分析单个像元上的变化特征来反映整个空间上的变化规律 (Song et al., 2018), 其计算公式如下:

$$S_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times y_i - (\sum_{i=1}^n i) \times (\sum_{i=1}^n y_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: n 是研究时间序列的长度; i 代表第 i 年; y_i 表示第 i 年的 NDVI 值; S_{slope} 代表 NDVI 随时间变化的变化速率。 $S_{\text{slope}} > 0$, 表示区域植被状况改善, 且数值越大说明改善效果越明显; 反之, 则表明区域植被状况变差。

M_{NDVI} 可以代表当年植被生长的最佳状态, 在植被变化趋势分析中具有重要意义。本文还使用 M_{NDVI} 计算了年度最大植被覆盖度 (P_v) (Carlson and Ripley, 1997), 公式如下:

$$P_v = [(M_{\text{NDVI}} - N_{\text{NDVI_min}}) \div (N_{\text{NDVI_max}} - N_{\text{NDVI_min}})]^2 \quad (3)$$

式中: $N_{\text{NDVI_min}}$ 和 $N_{\text{NDVI_max}}$ 的值分别为 0.1 和 0.8。

随后, 基于 Mann-Kendall (MK) 检验评价 2000—2020 年 MNDVI 变化趋势的显著性。MK 检验是一种非参数统计检验, 在降水、径流、气温和水质等时间序列的趋势变化研究中应用广泛 (Song et al., 2018)。对于独立分布的时间序列 ($x_1, x_2, \dots, x_n$), MK 检验的零假设 (H_0) 是没有趋势存在。根据检验统计量 S ($n \leq 8$) 或 Z ($n > 8$) 确定变化趋势的显著性, 其计算方法如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

式中: $\text{sgn}(x_j - x_i)$ 为符号函数, 计算公式如下:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$V(S) = \frac{1}{18} \times [n \times (n-1) \times (2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p \times (t_p-1) \times (2 \times t_p + 5)] \quad (6)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_j 和 x_i 分别为第 j 年和第 i 年 ($j > i$) 的 M_{NDVI} 值。相同的 M_{NDVI} 值被归为一个组, 唯一 M_{NDVI} 值被单独归为一组; t_p 表示任意给定组的范围, 即该组有多少个数; q 表示组的数量; V 代表 Var, 表示方差。当 $Z > 0$ 表示当前时间序列呈增加趋

势, $Z < 0$ 时表示当前时间序列呈减少趋势。如果 $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$, 则拒绝 H_0 , 并确定 M_{NDVI} 的变化趋势在置信水平 α 上具有统计学意义 (本研究 α 设为 0.1)。

2 结果与分析

2.1 洛川县土地利用变化

根据土地分类结果计算 2000—2020 年每种土地覆盖类型的分布以及面积差异, 如表 1 和图 2 所示。2000 年洛川县土地利用结构以耕地为主, 耕地占全县总面积的 32.1%, 主要植被类型中林地和草地分别占 25.2% 和 28.3%, 苹果园面积较小。结合 2000 年和 2020 年土地利用分类, 2000—2020 年研究区耕地、林地、草地以及苹果园面积均有明显变化, 耕地和草地总面积均减少, 林地和苹果园总面积增加。耕地面积由 2000

年的 578.5 km² 减少到 2020 年的 96.7 km², 仅为洛川县面积的 5.4%, 净减少面积 481.8 km²; 草地面积从 510.7 km² 减少到 148.1 km²; 苹果园面积从 122.4 km² 增至 402.0 km², 林地面积从 454.9 km² 增至 725.8 km², 2020 年苹果园和林地分别占洛川县面积的 22.3% 和 40.2%, 成为洛川县的主要土地利用类型。结合 2000—2020 年洛川县土地利用类型的转移情况 (图 3), 可知洛川县 21 a 间土地利用变化较为明显, 主要表现为耕地向苹果园, 草地向林地, 以及耕地向林地、草地的转变。洛川县拥有较多平坦塬面土地, 开发的耕地面积相对较大, 其中 317.5 km² 的耕地转为苹果园, 201.9 km² 的草地转为林地, 64.2 km² 的耕地转为林地和草地。洛川县主要植被覆盖面积由 2000 年的以耕地和林地为主逐渐发展为以苹果园和林地为主。

表 1 2000—2020 年洛川县土地利用类型转移矩阵

Tab. 1 The transfer matrix of different land use types in the Luochuan County during 2000—2020

单位: km² Unit: km²

土地利用类型 Land use type	苹果园 Apple orchard	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	其他 Other	总计 Total	转入面积 Transfer in area
苹果园 Apple orchard	42.05	317.52	2.39	37.06	2.95	401.97	359.92
耕地 Cropland	10.75	69.69	0.92	14.27	1.06	96.69	27.00
林地 Forest	35.56	35.35	400.76	201.90	52.27	725.84	325.08
草地 Grassland	4.83	28.82	6.23	106.18	2.06	148.12	41.94
其他 Other	29.21	127.08	44.58	151.30	78.74	430.91	352.17
总计 Total	122.40	578.46	454.88	510.71	137.08	1803.53	—
转出面积 Transfer out area	80.35	508.77	54.12	404.53	58.34	—	—

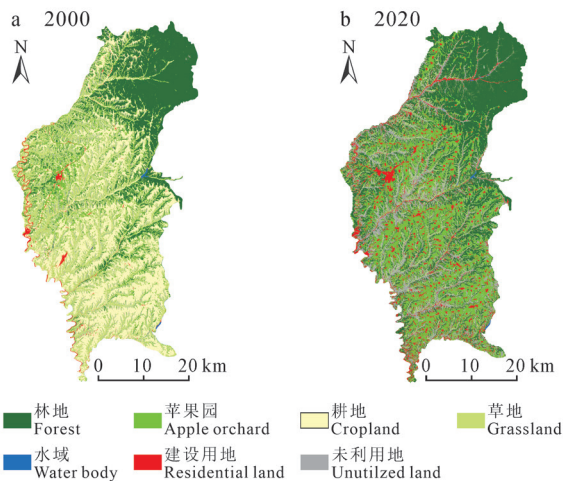


图 2 2000 年 (a) 和 2020 年 (b) 土地利用分布

Fig. 2 Classified images of study area in 2000 (a) and 2020 (b)

根据 Landsat 系列卫星影像结合实地采样, 计算 2000—2020 年苹果种植面积的变化。由表 2 可知: 自 2000 年起, 洛川县苹果种植面积逐年增长, 其中 2000 年为 122.4 km², 仅占洛川县总面积的 6.8%, 到 2005 年种植面积扩大到 304.6 km²; 截至 2020 年, 苹果种植面积达到 402.0 km², 占洛川县总面积的 22.3%。根据试验统计数据, 从 2000 年起, 苹果种植进入快速发展阶段, 而苹果种植区域大部分分布在坡度 $\leq 15^\circ$ 的适耕区, 结合土地类型转移情况以及洛川县的地形分布, 表明洛川县具有开展大规模农业生产的条件, 而苹果产业相较传统农业有更大的经济优势, 政府主导传统耕地的转变, 充分发挥农业县域的优势, 使苹果产业成为洛川经济发展的支柱产业之一, 在洛川经济

发展中占有重要地位。

2.2 黄土高原区洛川县植被覆盖度动态变化特征

洛川县 2000—2020 年 MNDVI 变化趋势表明(图 4): 2000—2020 年, 洛川县 45.6% 的区域植被覆盖呈现显著增加趋势, MNDVI 下降的区域集中在中部的建设用地。MNDVI 显著增加的地区主要分布在西部和北部, 结合主要植被类型转移情况, 这些地区的主要植被覆盖变化是耕地转为苹果园和耕地向林地的转变; 洛川县东部 MNDVI 没有发生显著变化, 植被类型主要是林地和建设用地, 研究期间洛川县东北部地区森林植被生长稳定。从整体上看, 洛川县植被覆盖度大幅提升(图 5), 平均植被覆盖度从 2000 年的 0.6 增至 2020 年的 0.9(图 6)。通过分析不同植被覆盖度面积变化发现, 这种变化具有阶段性特征, 2000—2007 年是洛川县植被覆盖的上升期, 2008 年以后为植被覆盖的平稳期。从不同覆盖度分级的面积比例变化来看, 2000 年洛川县近 60% 的区域植被覆盖度低于 0.6, 2020 年大部分地区的植被覆盖度上升到 0.6—0.8。植被覆盖度 > 0.8 的区域占比逐年

提高, 到 2007 年以后, 研究区内高植被覆盖度 (>0.8) 地区占研究区总面积的 1/2 以上。植被覆盖度 < 0.6 的区域占比则逐年减小, 到 2020 年降至 3.3%。

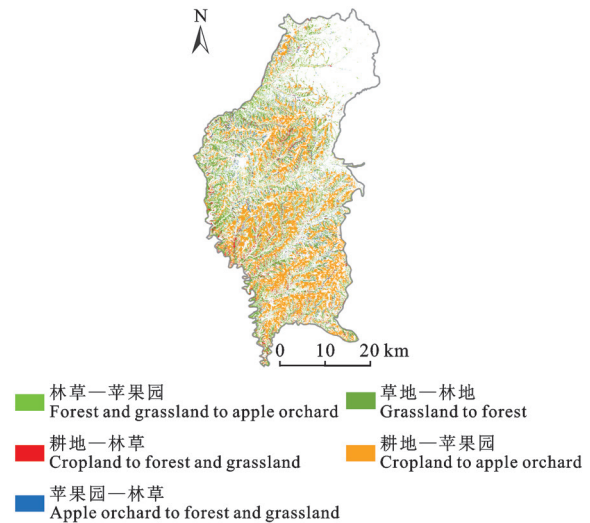


图 3 2000—2020 年主要植被类型转移情况
Fig. 3 The transfer of major vegetation types from 2000 to 2020

表 2 不同坡度下洛川县苹果园面积变化
Tab. 2 The area of apple orchards in Luochuan County varies under different slopes

坡度 Slope/(°)	2000 年		2005 年		2010 年		2020 年	
	面积 Area/km ²	占比 Ratio/%	面积 Area/km ²	占比 Ratio/%	面积 Area/km ²	占比 Ratio/%	面积 Area/km ²	占比 Ratio/%
≤2	26.76	21.86	67.40	22.13	66.10	20.71	101.98	25.37
(2, 6]	31.97	26.12	84.36	27.70	90.33	28.30	108.57	27.01
(6, 15]	25.48	20.82	60.00	19.70	62.46	19.57	78.87	19.62
(15, 25]	23.62	19.30	54.18	17.79	57.01	17.86	66.57	16.56
(25, 35]	13.37	10.92	34.80	11.43	38.91	12.19	41.36	10.29
>35	1.20	0.98	3.81	1.25	4.37	1.37	4.62	1.15
总计 Total	122.40	100.00	304.55	100.00	319.18	100.00	401.97	100.00

通过统计洛川县 2000 年主要植被类型和 2020 年主要植被类型及其主要变化类型的面积占比(图 7), 可以看出苹果园和林地的面积增加的最多, 2020 年洛川县植被覆盖的总面积为 1372.6 km², 其中苹果园和林地分别占全县植被覆盖面积的 29.3% 和 52.9%(表 1); 由其他土地类型转为苹果园后植被覆盖度增至 0.9; 而林地主要是由草地转换来, 占林地增加面积的 62.1%, 退耕还林草的面积仅占全县面积的 3.6%, 退耕后植被覆盖度从 2000 年的 0.6 增至 2020 年的 0.9。通过对比退

耕前后植被覆盖度的差异, 可以看出原土地利用类型转变为林地和苹果园后, 植被覆盖度均大幅提高, 表明退耕还林(草)工程中生态林和经济林建设都促进了区域植被覆盖的提高, 植被覆盖度较退耕前均有很大的改善。

2.3 洛川县土地利用和植被覆盖变化的地形分异

洛川县属于典型黄土地貌, 有着强烈的土壤侵蚀特征。研究显示, 在山区, 6°、15° 及 25° 是较为明显的土壤侵蚀临界坡度值。在土地利用中,

坡度 $\leq 6^\circ$ 为平缓地, 水土流失弱, 适宜进行农业生产; $(6^\circ, 15^\circ]$ 为缓坡地, 水流运动加快, 但不强烈, 仍是适合耕作的农业区域; 坡度 $>15^\circ$ 的坡地, 土壤侵蚀强烈, 水土流失严重, 不宜耕作, 是需要进行退耕还林(草)的地方(Uchida et al., 2005)。根据表 3, 洛川县 88.8% 的耕地坡度范围在 $(2^\circ, 6^\circ]$ 、 $(6^\circ, 15^\circ]$ 、 $(15^\circ, 25^\circ]$, 分别占 20.6%、39.8% 和 28.4%。洛川县适宜耕种的坡度 $\leq 15^\circ$ 的坡地面积占全县土地总面积的 66.0%, 坡度 $>15^\circ$ 的坡地面积占全县土地总面积的 34.0%。截至 2020 年绝大部分(83.5%)陡坡耕地($>25^\circ$)都已退

耕。整体来看洛川县的地形起伏不大, 需要退耕还林的面积相较于黄土高原其他区域较小, 比较适合农业发展; 研究区整体海拔高度东北高西南低, 各地类的分布基本按照当地的海拔和地貌发展, 土地利用较为符合当地的自然地理条件。此外, 洛川县各坡度范围内的耕地变化比例在 2000—2020 年发生了极大变化; 2000 年洛川县耕地面积为 578.5 km^2 , 各坡度范围内耕地均有分布且占各坡度坡地总面积的比例相当, 到 2020 年, 随着耕地面积的减少, 各坡度耕地面积所占比例也随之大幅下降。

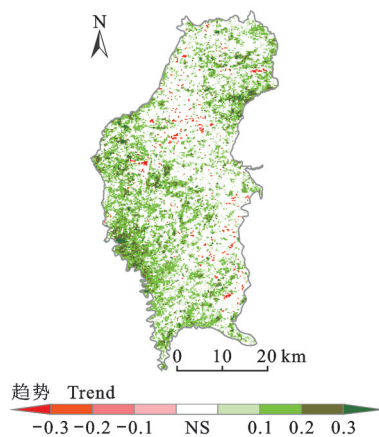


图 4 2000—2020 年 MNDVI 变化趋势
Fig. 4 Trend of MNDVI change from 2000 to 2020

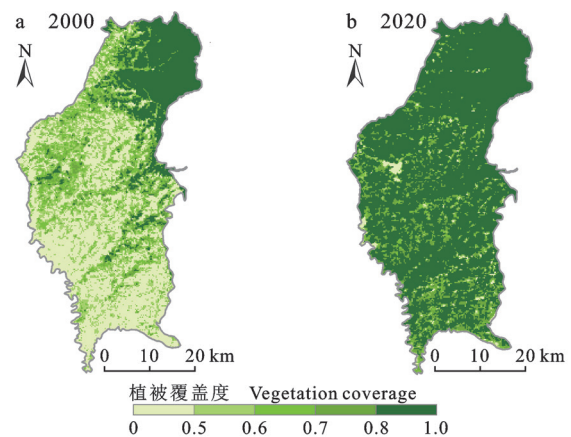


图 5 2000 年 (a) 和 2020 年 (b) 植被覆盖度
Fig. 5 Vegetation cover in 2000 (a) and 2020 (b)

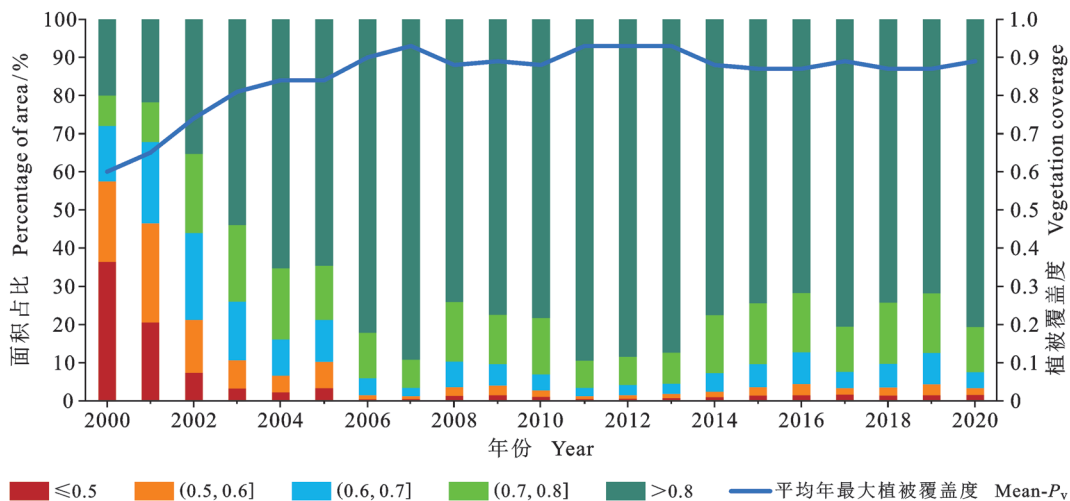


图 6 2000—2020 年逐年植被覆盖度及其不同等级面积比例变化
Fig. 6 The vegetation coverage and the proportion of areas of different grades changed from 2000 to 2020

洛川县的土地利用变化类型主要表现为耕地向苹果园, 草地向林地, 以及耕地向林地、草地

的转变。结合土地利用的变化情况和表 2 可以看出, 苹果园主要分布在 $\leq 6^\circ$ 的平缓坡地和 $(6^\circ,$

15°]的缓坡地内。2000年苹果种植零星分布在洛川县的耕地周围,其中平缓地($\leq 6^\circ$)和缓坡地($6^\circ, 15^\circ$]的种植面积占整个研究区苹果种植面积的67.1%;此后苹果种植区域向北部和东南部大范围扩大,到2010年,坡度 $\leq 15^\circ$ 的苹果园占苹果种植总面积的68.6%,到2020年,坡度 $\leq 15^\circ$ 的果园面积占苹果种植总面积的72.0%。

表4为洛川县不同坡度下的主要植被转移面

积和转移前后植被覆盖度变化情况,可以看出:耕地转苹果园是植被转移的主要类型,多分布在较为平缓的坡地,其中坡度 $\leq 15^\circ$ 的适耕区占72.8%,面积为231.3 km²。耕地转为苹果园区域植被覆盖度从0.5增长至0.8。除耕地和林地转为苹果园的情况外,其余植被转移大多发生在($2^\circ, 6^\circ$]坡度范围内,转移面积占该转移类型的25%以上。

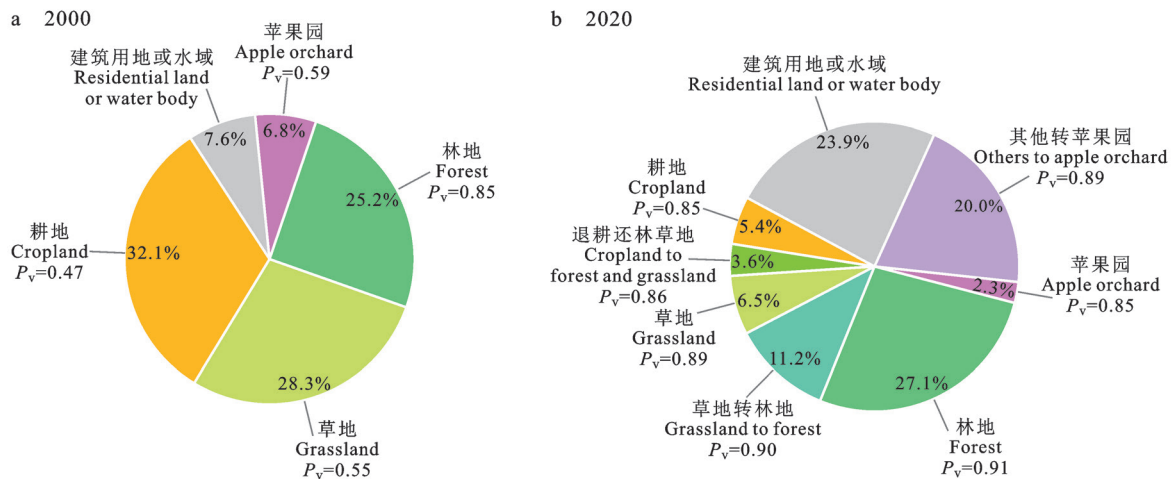


图7 2000年(a)和2020年(b)主要植被类型占比及植被覆盖度

Fig. 7 Proportion of major vegetation types and vegetation coverage in 2000 (a) and 2020 (b)

表3 2000年和2020年不同坡度下耕地面积变化

Tab. 3 The area of cropland varies under different slopes in 2000 and 2020

坡度 Slope/(°)	总面积比例 Area proportion/%	2000				2020			
		面积	Area/km ²	占比	Proportion/%	面积	Area/km ²	占比	Proportion/%
≤ 2	5.62	145.54		25.16		20.88		21.59	
(2, 6]	20.59	163.07		28.19		25.22		26.08	
(6, 15]	39.82	109.85		18.99		20.49		21.19	
(15, 25]	28.37	94.06		16.26		19.20		19.86	
(25, 35]	5.31	59.29		10.25		9.88		10.22	
> 35	0.29	6.65		1.15		1.02		1.06	
总计 Total	100.00	578.46		100.00		96.69		100.00	

3 讨论

生态工程开展以来,黄土高原土地利用变化十分明显。生态工程驱动下的土地覆盖类型变化可能会导致生态服务和功能的变化。如果在发展过程中不考虑这些变化,生态工程可能会取得相反的结果。此前黄土高原的退耕还林(草)工程主要集中于坡耕地的改造上,其植被恢复主要是通过人工造林,2000年后黄土高原植被NDVI增长区域面积达到总面积的91.9%,其中林地持续增加(修丽娜等,2019;赵亮等,2019),现已接

近饱和状态(陈怡平等,2015)。区域的可持续发展应兼顾生态保护和社会发展两个方面,一方面生态环境对社会经济系统的响应可能具有一定的滞后性(鹿晨昱等,2015;冯俊华和张路路,2022);另一方面,社会经济和环境因素对提高造林效益有重要影响(Wu et al., 2021),随着越来越多的劳动力从事农业以外的工作,对粮食生产的依赖减少,导致土地提供生计的压力减少,植树造林的成效也随之增加(Bryan et al., 2018)。

研究期内,洛川县植被覆盖在生态工程初期

增幅最大，而洛川县不是典型的退耕还林（草）区域，沟壑区少，塬面的耕地可以很好地满足农业活动，需要退耕的坡耕地面积小，土地转移状况表明研究区生态林面积变化不大，增长的林地面积主要依靠草地转变而来。苹果园的分布主要集中在平缓坡地，且随苹果种植面积的增大，苹果园面积在平缓坡地的占比也随之增大，主要有以下几方面原因：首先苹果园相较于其他林地而言，需要进行维护和采摘等农事活动，人为活动频繁，平缓坡地利于人们的劳作，且更容易使用农用机械，有利于发展集约化现代果园生产模式，因此苹果园在坡度较大的范围内分布较少；

此外，研究区地貌以塬面为主，耕地的开发主要是在塬面上进行，而研究区苹果园面积的增加主要是由于耕地转变而来，这种政府主导的利用地理环境的优越条件开展的土地覆盖方式的转变，有助于农业生产的多样化，增加经济总量。由于大面积推广苹果种植，洛川县植被覆盖度得到大幅提升，在加快经济发展的同时也加强了生态环境的保护。由于洛川政府大力扶持推进农耕地向苹果园的转变，当地经济取得较大的发展。洛川县土地利用变化带来的经济效益和植被覆盖度的增加，是区域植被建设与特色经济需求双重驱动的结果。

表 4 洛川县植被类型变化的地形分异和植被覆盖度变化									
Tab. 4 Topographic classification of vegetation types change and vegetation coverage change in Luochuan County									
植被转移 Vegetation change	转移面积 Area/km ²	坡度分级占比 Proportion of classification of slope/%						植被覆盖度 Vegetation coverage/%	
		≤2°	(2°, 6°]	(6°, 15°]	(15°, 25°]	(25°, 35°]	>35°	2000	2020
耕地—林地 Cropland to forest	35.35	16.55	26.05	21.46	23.09	11.82	1.03	0.57	0.87
耕地—草地 Cropland to grassland	28.82	16.53	25.60	21.15	24.49	11.38	0.85	0.56	0.85
草地—林地 Grassland to forest	201.90	16.93	29.40	19.47	19.80	12.98	1.42	0.53	0.90
耕地—苹果园 Cropland to apple orchard	317.52	26.54	26.41	19.89	16.40	9.72	1.04	0.48	0.84
林地—苹果园 Forest to apple orchard	2.39	9.75	21.52	27.86	27.72	12.25	0.90	0.58	0.95
草地—苹果园 Grassland to apple orchard	37.06	17.37	25.00	22.15	22.62	11.74	1.12	0.55	0.86
苹果园—林地 Apple orchard to forest	35.56	14.79	26.28	21.69	23.37	12.86	1.01	0.53	0.91

该区域的发展模式有助于对社会经济发展与生态环境保护之间的关系产生新认识，在未来黄土高原的植被建设中，应进一步研究典型县域尺度不同植被类型的生态效益，形成地方标准，进而制定相关生态建设规划和策略，实现经济与环境共同发展。需要指出的是，本研究在影像分辨率上还存在一定误差，后续应在解译精度上更加精细化，并考虑气候等多因子进行量化分析。

4 结论

利用遥感信息技术可以快速确定政策牵动下的经济发展水平，评估经济政策和生态环境治理的成效。通过 NDVI 数据提取的植被覆盖信息和

Landsat 系列卫星影像提取的土地利用信息，评估了以苹果种植为特色的黄土高原塬区洛川县自 2000 年以来植被覆盖和土地利用的变化及其地形分异。得出主要结论如下：

（1）研究区自 2000 年以来苹果园面积大幅增加，主要植被覆盖结构发展成林地>苹果园>草地。2000—2020 年，洛川县土地利用变化主要表现为适耕区耕地发展成苹果园，平缓坡草地转为苹果园，以及坡耕地退还林草。到 2020 年，洛川县植被覆盖情况得到全面改善，全县林地面积达 725.8 km²，苹果种植面积达 402.0 km²。

（2）生态工程实施以来，洛川县植被覆盖度大幅提升，到 2020 年坡耕地植被覆盖度为 0.9，

耕地改种苹果后,转变区域植被覆盖度从0.5增至0.8。县域植被覆盖变化的空间差异明显,植被改善的区域集中于洛川县西部和北部,这些地区的主要植被覆盖变化是耕地转为苹果园和耕地向林地的转变。

(3)到2020年,83.5%的陡坡耕地都已退耕,退耕还林草的面积仅占全县面积的3.6%,洛川县土地变化中坡耕地还林草的面积远小于耕地等其他地类改种苹果的面积,因此,洛川县植被覆盖度的提升主要是政府大力推广苹果种植的结果。

参考文献

- 陈学渊,张春英,韩晓静,等.2021.退耕还林过程中旱地—林地景观梯度时空变化分析——以西北旱区陕西耀州为例[J].*中国农业资源与区划*,42(3):7–15.[Chen X Y, Zhang C Y, Han X J, et al. 2021. Spatial-temporal change analysis of landscape gradient in the process of reverting farmland to forest in northwest arid region—a case study of Yaozhou, Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 42(3): 7–15.]
- 陈怡平,骆世明,李凤民,等.2015.对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J].*地球环境学报*,6(5):265–269.[Chen Y P, Luo S M, Li F M, et al. 2015. Proposals on the sustainable development of agriculture in Yan'an gully regions [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(5): 265–269.]
- 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.2020.退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J].*自然资源学报*,35(4):826–844.[Deng Y J, Yao S B, Hou M Y, et al. 2020. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: a case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 35(4): 826–844.]
- 冯俊华,张路路.2022.陕西省新型城镇化与生态环境协调度研究[J].*生态学报*,42(11):4617–4629.[Feng J H, Zhang L L. 2022. Coordination degree between new urbanization and ecological environment in Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(11): 4617–4629.]
- 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.2009.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].*地球科学进展*,24(6):571–576.[Fu B J, Zhou G Y, Bai Y F, et al. 2009. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China [J]. *Advances in Earth Science*, 24(6): 571–576.]
- 高海东,庞国伟,李占斌,等.2017.黄土高原植被恢复潜力研究[J].*地理学报*,72(5):863–874.[Gao H D, Pang G W, Li Z B, et al. 2017. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(5): 863–874.]
- 郭永强,王乃江,褚晓升,等.2019.基于Google Earth Engine分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J].*中国环境科学*,39(11):4804–4811.[Guo Y Q, Wang N J, Chu X S, et al. 2019. Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine [J]. *China Environmental Science*, 39(11): 4804–4811.]
- 鹿晨昱,王春娟,张子龙,等.2015.陇东黄土高原地区资源消耗、环境污染与经济增长的耦合关系——以庆阳市为例[J].*生态学杂志*,34(9):2681–2690.[Lu C Y, Wang C J, Zhang Z L, et al. 2015. Coupling relationships of resource consumption, environmental pollution and economic growth in Loess Plateau region of eastern Gansu Province: a case study of Qingyang City [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 34(9): 2681–2690.]
- 孙智辉,雷延鹏,卓静,等.2010.延安北部丘陵沟壑区退耕还林(草)成效的遥感监测[J].*生态学报*,30(23):6555–6562.[Sun Z H, Lei Y P, Zhuo J, et al. 2010. Remote sensing analysis of the effectiveness of converting farmland into forest or grass in the hilly gully region of northern Yan'an [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 30(23): 6555–6562.]
- 王建邦,赵军,李传华,等.2019.2001—2015年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J].*地理学报*,74(3):504–519.[Wang J B, Zhao J, Li C H, et al. 2019. The spatial-temporal patterns of the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 74(3): 504–519.]
- 王延平,韩明玉,张林森,等.2012.洛川苹果园土壤水分变化特征[J].*应用生态学报*,23(3):731–738.[Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, et al. 2012. Variation characteristics of soil moisture in apple orchards of Luochuan County, Shaanxi Province of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(3): 731–738.]
- 修丽娜,颜长珍,钱大文,等.2019.生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J].*水土保持通报*,

- 39(4): 214–221, 228, 2. [Xiu L N, Yan C Z, Qian D W, et al. 2019. Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(4): 214–221, 228, 2.]
- 张 茂, 张 霞, 胡光成, 等. 2021. 遥感干旱指数在洛川苹果干旱监测中的适用性分析 [J]. *遥感技术与应用*, 36(1): 187–197. [Zhang M, Zhang X, Hu G C, et al. 2021. Applicability analysis of remote sensing based drought indices in drought monitoring of apple in Luochuan [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(1): 187–197.]
- 赵 亮, 刘 宇, 罗 勇, 等. 2019. 黄土高原近 40 年人类活动强度时空格局演变 [J]. *水土保持研究*, 26(4): 306–313. [Zhao L, Liu Y, Luo Y, et al. 2019. Temporal and spatial evolution of human impact intensity on the Loess Plateau in recent 40 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 26(4): 306–313.]
- 赵明伟, 王 妮, 施慧慧, 等. 2019. 2001—2015 年间我国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析 [J]. *干旱区地理*, 42(2): 324–331. [Zhao M W, Wang N, Shi H H, et al. 2019. Spatial-temporal variation and its driving forces of vegetation coverage in China from 2001 to 2015 [J]. *Arid Land Geography*, 42(2): 324–331.]
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2017. GB/T 21010—2017, 土地利用现状分类 [S]. 北京: 中国标准出版社. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2017. GB/T 21010—2017, current land use classification [S]. Beijing: Standards Press of China.]
- 朱会义, 李秀彬. 2003. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论 [J]. *地理学报*, 58(5): 643–650. [Zhu H Y, Li X B. 2003. Discussion on the index method of regional land use change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 58(5): 643–650.]
- Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, et al. 2018. China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. *Nature*, 559(7713): 193–204.
- Carlson T N, Ripley D A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 62(3): 241–252.
- Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. 2015. Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 8(10): 739–741.
- DeFries R S, Bounoua L, Collatz G J. 2002. Human modification of the landscape and surface climate in the next fifty years [J]. *Global Change Biology*, 8(5): 438–458.
- Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. 2013. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(S1): 3665–3672.
- Rindfuss R R, Walsh S J, Turner B L 2nd, et al. 2004. Developing a science of land change: challenges and methodological issues [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(39): 13976–13981.
- Shi H, Shao M G. 2000. Soil and water loss from the Loess Plateau in China [J]. *Journal of Arid Environments*, 45(1): 9–20.
- Song X L, Gao X D, Wu P T, et al. 2020. Drought responses of profile plant-available water and fine-root distributions in apple (*Malus pumila* Mill.) orchards in a loessial, semi-arid, hilly area of China [J]. *Science of the Total Environment*, 723: 137739. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137739.
- Song Y, Jin L, Wang H B. 2018. Vegetation changes along the Qinghai-Tibet Plateau engineering corridor since 2000 induced by climate change and human activities [J]. *Remote Sensing*, 10(1): 95. DOI: 10.3390/rs10010095.
- Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. 2003. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 24(5): 1111–1117.
- Uchida E, Xu J T, Rozelle S. 2005. Grain for green: cost-effectiveness and sustainability of China's conservation set-aside program [J]. *Land Economics*, 81(2): 247–264.
- Wu X T, Wang S, Fu B J, et al. 2021. Spatial variation and influencing factors of the effectiveness of afforestation in China's Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 771: 144904. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144904.