

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.008.

陈浩, 权倍平, 李占斌, 等. 北洛河上游流域植被覆盖度时空变化及其地形分异特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 219-227.

Chen Hao, Quan Beiping, Li Zhanbin, et al. Spatiotemporal Changes of Vegetation Coverage and Its Topographic Differentiation Characteristics in the Upper Reaches of Beiluo River Watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 219-227.

# 北洛河上游流域植被覆盖度时空变化及其 地形分异特征

陈浩<sup>1,2</sup>, 权倍平<sup>3</sup>, 李占斌<sup>2</sup>, 郭晋伟<sup>4</sup>, 李伟涛<sup>1</sup>, 张晓萍<sup>4</sup>

(1.延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 716000;

2.西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 3.延安大学 图书馆, 陕西 延安 716000;

4.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**[目的]揭示退耕还林还草工程实施前后黄土丘陵沟壑区流域植被恢复过程, 阐明流域植被恢复的地形分异效应, 进而为黄土丘陵沟壑区制定适宜的流域生态建设和保护对策提供科技支撑。[方法]基于北洛河上游流域 1990—2019 年 4 期 Landsat 影像及数字高程模型数据, 利用像元二分模型结合 GIS 技术, 开展了退耕还林还草工程实施前后该流域植被覆盖度变化地形分异特征研究。[结果](1) 流域植被覆盖度在空间上呈现东南高、西北低的分异特征。1990—2019 年流域年均植被覆盖度呈持续上升趋势, 在退耕还林还草工程实施以后高等级植被覆盖度面积占比大幅提升, 1990 年、2000 年、2010 年、2019 年高等级植被覆盖度面积占比分别为 0.97%, 6.96%, 42.17%, 64.18%。(2) 在工程实施的各个时期, 流域植被覆盖度总体持续改善, 但西北局部地区植被退化。研究期间, 流域植被覆盖度结构改善明显, 中高及高植被覆盖度面积以转入为主, 中低及低植被覆盖度面积以转出为主。(3) 流域植被覆盖度在地形上存在明显分异特征, 植被覆盖度随高程的增加呈减小趋势, 植被覆盖度与坡度呈正相关, 坡度越陡, 植被覆盖度越大, 植被覆盖度随坡向遵循阴坡>半阴坡>平地>半阳坡>阳坡的分布规律。[结论]实施退耕还林还草工程对增加北洛河上游流域植被覆盖度起到了关键作用, 但部分区域植被退化严重, 未来该流域应重点关注城市空间扩展以及气候变化对植被建设的影响, 以应对环境演变下植被生态系统可持续发展面临的挑战。

**关键词:**植被覆盖度; 时空变化; 地形因子; 退耕还林还草工程; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0219-09

## Spatiotemporal Changes of Vegetation Coverage and Its Topographic Differentiation Characteristics in the Upper Reaches of Beiluo River Watershed

Chen Hao<sup>1,2</sup>, Quan Beiping<sup>3</sup>, Li Zhanbin<sup>2</sup>, Guo Jinwei<sup>4</sup>, Li Weitao<sup>1</sup>, Zhang Xiaoping<sup>4</sup>

(1.College of Life Science, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 2.Institute of Water

Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3.Yan'an University

Library, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 4.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the

Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:**[Objective] The aims of this study are to reveal the process of vegetation restoration in loess hilly and gully region before and after the implementation of the Grain for Green Project as well as its topographic differentiation effects, and to provide scientific support for formulating appropriate regional ecological construction and protection countermeasures. [Methods] Based on four Landsat images and digital elevation

收稿日期: 2023-04-17

修回日期: 2023-05-30

资助项目: 国家自然科学基金(42107359); 中国博士后科学基金(2022MD713800); 延安市高层次人才专项(2019-16); 延安大学科研计划资助项目(YDBK2019-63); 大学生创新创业训练计划项目(D2021118)

第一作者: 陈浩(1986—), 男, 陕西榆林人, 博士, 讲师, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: chen hao@yau.edu.cn

通信作者: 张晓萍(1971—), 女, 河南焦作人, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复的水文效应及水土流失过程评价研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

model data from 1990 to 2019 in the upper reaches of the Beiluo River watershed, the spatiotemporal changes of vegetation coverage and its topographic differentiation characteristics of the study area before and after the implementation of the Grain for Green project were studied using pixel dichotomy model and GIS technology. [Results] (1) The spatial distribution of vegetation coverage in the watershed was high in the southeast and lower in the northwest. From 1990 to 2019, the average annual vegetation coverage of the watershed showed a continuous increasing trend, and the proportion of high-grade vegetation coverage area increased significantly after the implementation of the Grain for Green Project. The proportions of high-grade vegetation coverage area in 1990, 2000, 2010 and 2019 were 0.97%, 6.96%, 42.17% and 64.18%, respectively. (2) In each period of the Grain for Green Project, the vegetation coverage of the watershed improved continuously, but the vegetation degradation occurred in small parts of northwestern of the watershed. During the study period, vegetation coverage structure of the watershed significantly improved. The area with medium-high and high vegetation coverage was mainly transferred in, and the area with medium-low and low vegetation coverage was mainly transferred out. (3) Topographic factors had an obvious impact on the vegetation coverage distribution pattern in the watershed. The vegetation coverage tended to decrease with the increase of elevation. The vegetation coverage was positively correlated with slope, and the steeper the slope, the greater the vegetation coverage. The vegetation coverage showed the characteristics of shady slope > half-shady slope > flat land > half-sunny slope > sunny slope. [Conclusion] The implementation of the Grain for Green Project plays a key role in increasing the vegetation coverage in the upper reaches of the Beiluo River watershed, but the vegetation degradation is serious in some areas. In the future, more attention should be paid to the impact of the urban spatial expansion and climate change on vegetation construction in the watershed, so as to cope with the challenges of sustainable development of vegetation ecosystem under the changing environment.

**Keywords:** vegetation coverage; spatiotemporal changes; topographic factors; Grain for Green Project; loess hilly and gully region

植被是构成陆地生态系统最重要的组分<sup>[1]</sup>,具有拦截降雨、削弱雨滴对地表土壤的打击力、增加土壤入渗、改善土壤性质等多方面作用,是区域生态环境及水土流失评价中的主要监测指标。归一化植被指数(NDVI)常被用于表征研究区植被覆盖和植被生长状况的植被指数。近年来,诸多学者基于不同数据源的NDVI数据对不同空间尺度上的植被覆盖度动态变化及其影响因素的响应机制进行了深入研究<sup>[2-3]</sup>。研究表明植被覆盖度变化是自然(气候和地形等)和人类活动因素共同作用的结果<sup>[4]</sup>。其中地形通过控制太阳辐射和大气降水的再分配过程,并在一定程度上影响人类活动,进而对植被的空间分布格局产生影响<sup>[5]</sup>。因此,分析并揭示研究区植被覆盖时空变化及其地形分异特征,对制定适宜的植被恢复与保护对策具有重要意义。

黄土高原生态环境极其脆弱,水土流失异常严重,为改变这种状况,一系列生态治理工程相继在该区实施,经过多年治理,黄土高原植被覆盖状况发生了极大变化<sup>[6]</sup>,由此引起区域土壤侵蚀强度及黄河输沙量出现了历史性剧减<sup>[7]</sup>。现有研究表明,尽管气候因子是影响植被覆盖变化的重要因素,但随着大规模

植被建设工程的实施,黄土高原植被覆盖对气候因子变化的敏感性降低<sup>[8]</sup>,以退耕还林还草工程为主的人类活动已成为影响该区植被覆盖度变化的主要因素<sup>[9]</sup>。黄土高原中部的丘陵沟壑区是区域内植被恢复尤为显著的地区<sup>[10]</sup>,同时黄土高原陡坡区植被覆盖度增速也最为明显<sup>[11-12]</sup>。有研究指出黄土丘陵沟壑区是黄土高原未来植被恢复潜力较高的地区之一<sup>[13]</sup>。流域具有相对独立和完整的地形特征,并且常被用于探究植被覆盖度演变规律的典型地貌单元<sup>[14-15]</sup>,因此从流域尺度开展黄土丘陵沟壑区植被恢复过程及其在地形上的分异特征,是理解环境演变下流域生态水文过程响应的重要基础。

地处黄土高原丘陵沟壑区的北洛河上游流域既是黄河中游粗泥沙的主要策源区之一,也是全国实施水土流失综合治理的重点地区。流域内吴起县作为全国退耕还林典型县自1998年率先开始大规模实施了封山退耕、植树种草、舍饲养羊等政策,为该流域植被恢复及生态环境改善起到了关键作用。研究显示,在退耕还林还草工程的影响下,北洛河上游吴起县所在地区土地利用结构发生巨大变化,植被恢复效果明显好于周围县域<sup>[16-17]</sup>,吴起县植被覆盖度变化呈现出

与退耕还林累计完成面积变化较为一致的趋势<sup>[18]</sup>。以往研究较多关注生态恢复背景下北洛河上游流域土壤侵蚀产沙强度与河流水沙演变过程的分析及评价<sup>[19]</sup>,而有关退耕还林还草工程实施前后流域植被覆盖变化及其与地形因子之间关系的研究仍较为薄弱。因此,本文选择黄土丘陵沟壑区退耕还林植被恢复较为典型的北洛河上游流域为研究区,基于流域退耕还林还草工程实施前期(1990年)、初期(2000年)、中期(2010年)和近期(2019年)4期 Landsat 影像与数字高程模型数据,利用像元二分模型结合 GIS 空间分析方法,分析流域植被覆盖度时空变化及其地形分异特征,以期为该区域植被恢复及生态水文过程响应研究提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

北洛河为黄河二级支流,其上游吴旗水文站控制部分(107°32′40″—108°32′45″E, 36°44′53″—37°19′28″N),海拔 1 265~1 886 m,总面积 3 408 km<sup>2</sup>(图 1)。流域地貌类型属于黄土高原丘陵沟壑区第二副区,地貌景观以黄土梁、峁、涧和河谷等为主。气候为温带大陆性季风气候,多年(1963—2011 年)平均降水量为 459.1 mm,汛期降水量占全年的 74.5%。降水量在空间上呈现西北少、东南多的分布格局。流域内土类分布以黄绵土为主,占总面积的 89.3%,其土质疏松,抗侵蚀性较差。流域内水力侵蚀极为强烈,年均侵蚀模数 7 006 t/(km<sup>2</sup>·a)。流域属于我国水土保持重点建设和退耕还林试点区域,自 1999 年实施退耕还林还草工程以来,林草覆盖面积明显增长,形成以落叶阔叶及灌木草丛为主的人工次生植被类型。流域内吴起县植被恢复效果显著,截至目前,该县累计完成退耕还林面积达 1 631.93 km<sup>2</sup>,占全县总面积的 43.0%,因此被誉为“全国退耕还林先进县”。

### 1.2 数据来源及处理

本研究选用的遥感数据为 1990 年、2000 年、2010 年、2019 年 4 期 Landsat 影像,下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m,轨道编号为 128/34,4 期影像数据平均云量均低于 1%,图像质量良好,成像时间集中于 6 月和 7 月,处于植被生长旺盛期,具有可比拟性,并对影像数据均进行前期基本预处理。DEM 数据采用 ASTER GDEM V1 数字高程数据产品(分辨率 30 m×30 m)来源于国际科学数据服务平台。上述所有数据的投影方式均转化为 WGS 84 坐标系的通用横轴墨卡托投影(UTM),再以流域矢量边界数据裁剪获得研究区的最终数据。

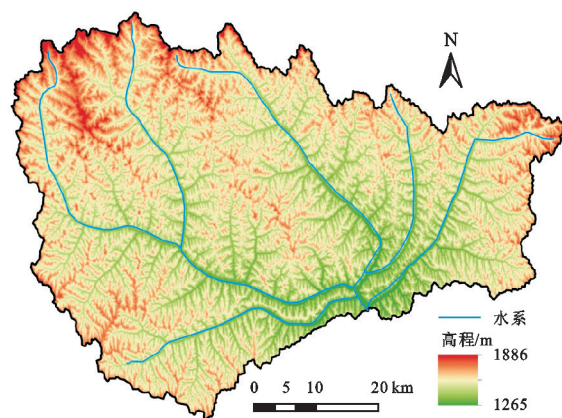


图 1 北洛河上游流域高程及水系分布

Fig. 1 Elevation and drainage distribution in the upper reaches of Beiluo River watershed

### 1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度估算与分级 归一化植被指数的提取方法为:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

式中:NDVI 为归一化植被指数;NIR 和 R 分别为多光谱影像的近红外波段(0.7~1.1 μm)与可见光红波段(0.4~0.7 μm)的反射率。利用李苗苗等<sup>[20]</sup>建立的基于 NDVI 估算植被覆盖度的模型,得到流域植被覆盖度图,公式如下:

$$F_{vc} = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中: $F_{vc}$ 为植被覆盖度(%);NDVI 为影像中各像元的 NDVI 值;NDVI<sub>soil</sub>和 NDVI<sub>veg</sub>分别为无植被覆盖区域和完全被植被覆盖区域像元的 NDVI 值。为消除图像噪声带来的干扰,本文参考前人的研究<sup>[20-21]</sup>,NDVI<sub>soil</sub>和 NDVI<sub>veg</sub>分别取 NDVI 影像统计数据累积频率为 5%和 95%的 NDVI 值,然后根据公式(2),得到流域植被覆盖度分布图。

根据已有研究成果<sup>[22]</sup>,结合研究区实际情况,将计算得到的  $F_{vc}$  按其大小分为低植被覆盖度( $F_{vc} < 10\%$ )、中低植被覆盖度( $10\% \leq F_{vc} < 30\%$ )、中等植被覆盖度( $30\% \leq F_{vc} < 50\%$ )、中高植被覆盖度( $50\% \leq F_{vc} < 70\%$ )和高植被覆盖度( $F_{vc} \geq 70\%$ )5 个级别。

1.3.2 植被覆盖度变化等级划分 采用差值法获得流域植被覆盖度变化值,公式如下:

$$\Delta F_{vc} = F_{vc,2} - F_{vc,1} \quad (3)$$

式中: $\Delta F_{vc}$ 为流域植被覆盖度变化值(%), $F_{vc,1}$ 和  $F_{vc,2}$ 分别为流域前后两个时期的植被覆盖度(%)。设置阈值,对流域植被覆盖度变化值进行等级划分。 $\Delta F_{vc} < -20\%$ 为严重退化区; $-20\% \leq \Delta F_{vc} < -5\%$ 为轻微退化区; $-5\% \leq \Delta F_{vc} < 5\%$ 为稳定区; $5\% \leq \Delta F_{vc} < 20\%$ 为轻微改善区; $\Delta F_{vc} \geq 20\%$ 为强烈改善区。



### 1.3.3 植被覆盖度等级类型的转移速度与状态指数

采用不同植被覆盖度等级类型的转出速度和转入速度反映其动态变化程度,并结合状态指数探究其变化的趋势和状态<sup>[23,14]</sup>。公式如下:

$$V_{i,out} = \frac{F_{i,t_1} - U_i}{F_{i,t_2}(t_2 - t_1)} \times 100\% \quad (4)$$

$$V_{i,in} = \frac{F_{i,t_2} - U_i}{F_{i,t_2}(t_2 - t_1)} \times 100\% \quad (5)$$

$$D_i = \frac{V_{i,out} - V_{i,in}}{V_{i,out} + V_{i,in}} \quad (6)$$

式中:  $V_{i,out}$  为  $t_1-t_2$  期间第  $i$  类植被覆盖度等级类型的转出速度;  $V_{i,in}$  为相应的转入速度;  $t_1$  为统计初期;  $t_2$  为统计末期;  $F_{i,t_1}$  为  $t_1$  时期第  $i$  类植被覆盖度等级类型的面积;  $F_{i,t_2}$  为  $t_2$  时期第  $i$  类植被覆盖度等级类型的面积;  $U_i$  为  $t_1-t_2$  期间第  $i$  类植被覆盖度等级类型未变化的面积;  $D_i$  为同时期第  $i$  类植被覆盖度等级类型的状态指数。

当  $-1 \leq D_i \leq 0$  时,从  $t_1-t_2$  期间第  $i$  类植被覆盖度等级类型的转入速度大于转出速度,面积增加,处于“扩张”状态;当  $0 < D_i \leq 1$  时,  $t_1-t_2$  期间第  $i$  类植被覆盖度等级类型的转入速度小于转出速度,面积减小,处于“缩减”状态。  $D_i$  越接近  $-1$ ,说明第  $i$  类植被覆盖度等级类型的转入速度远大于转出速度,面积大幅增加,处于极不平衡状态;  $D_i$  越接近  $1$ ,说明第  $i$  类植被覆盖度等级类型的转出速度远大于转入速度,面积大幅减小,处于极不平衡状态;  $D_i$  越接近  $0$ ,则存在两种情况,一种情况是第  $i$  类植被覆盖度等级类型的转入速度和转出速度都很小,呈现平衡状态,另一种情况是第  $i$  类植被覆盖度等级类型的转入速度和转出速度都很大,该植被覆盖度等级类型双向转换明显,处于高转出和高转入情况下的一种平衡状态。

1.3.4 地形因子的提取与分级 基于研究区 DEM 数据提取各地形因子。采用等间距法将研究区高程分为 7 个等级:  $<1\ 300\text{ m}$ ,  $1\ 300 \sim 1\ 400\text{ m}$ ,  $1\ 400 \sim 1\ 500\text{ m}$ ,  $1\ 500 \sim 1\ 600\text{ m}$ ,  $1\ 600 \sim 1\ 700\text{ m}$ ,  $1\ 700 \sim 1\ 800\text{ m}$ ,

$>1\ 800\text{ m}$ 。依据水土流失常规调查中的临界坡度分级法,将研究区坡度分为 6 级,依次为  $0^\circ \sim 5^\circ$ ,  $5^\circ \sim 8^\circ$ ,  $8^\circ \sim 15^\circ$ ,  $15^\circ \sim 25^\circ$ ,  $25^\circ \sim 35^\circ$ ,  $>35^\circ$ 。根据坡向与环境因子的关系,将研究区坡向分为 5 个级别,分别为阴坡(东北,北:  $337.5^\circ \sim 360^\circ$ ,  $0^\circ \sim 67.5^\circ$ )、半阴坡(西北,东:  $67.5^\circ \sim 112.5^\circ$ ,  $292.5^\circ \sim 337.5^\circ$ )、半阳坡(西,东南:  $112.5^\circ \sim 157.5^\circ$ ,  $247.5^\circ \sim 292.5^\circ$ )、阳坡(南,西南:  $157.5^\circ \sim 247.5^\circ$ )、平地( $0^\circ$ )<sup>[24]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 北洛河上游流域植被覆盖度空间分布特征

将流域各时期植被覆盖度的分布,依据其划分等级,得到 1990 年、2000 年、2010 年、2019 年北洛河上游流域植被覆盖度等级分布及其特征(图 2、表 1)。4 个时期流域平均植被覆盖度分别为 16.82%, 30.79%, 47.57%, 57.41%, 呈持续增加趋势(图 2)。流域植被覆盖度在空间上呈现东南高、西北低的分布特征。1990 年和 2000 年,中低及低植被覆盖主要分布在西北部定边县域,中等及以上植被覆盖主要分布在东南部吴起县域。相比前两个时期,2010 年和 2019 年,流域植被覆盖东南高西北低的空间分布特征较为明显,中高及高植被覆盖主要分布在东南部吴起县域,中等及以下植被覆盖以西北部定边县域为主,植被覆盖度等级在县域上呈现出明显的界线。

1990—2019 年流域植被覆盖度等级结构变化显著(表 1),4 个时期低等级(中低及低)植被覆盖度区域面积占比整体减小(1990 年、2000 年、2010 年、2019 年分别为 89.85%, 47.17%, 13.31%, 22.27%),高等级(中高及高)植被覆盖度区域面积占比持续增加(1990 年、2000 年、2010 年、2019 年分别为 0.97%, 6.96%, 42.17%, 64.18%),而中等级植被覆盖度区域面积占比先提高后降低,总体呈增加趋势。由此可见,30 a 间流域植被覆盖度持续增加,以 2000 年以来植被覆盖度变化最为显著,高等级植被覆盖度区域面积占比大幅增加,且主要分布在流域东南部吴起县域。

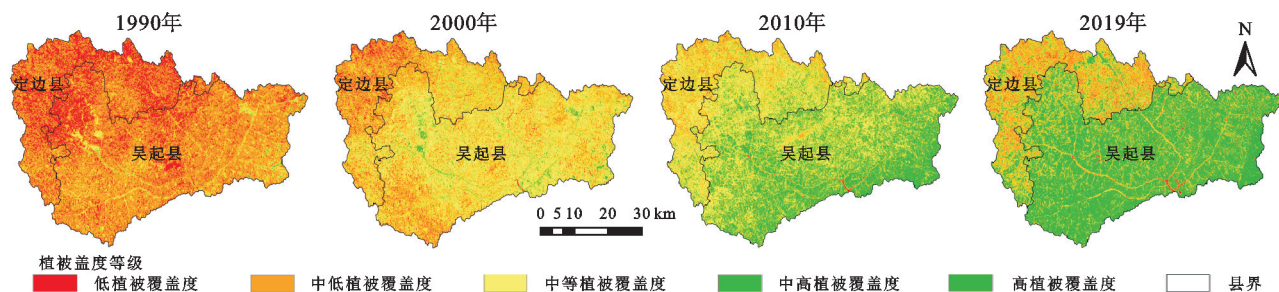


图 2 1990 年、2000 年、2010 年和 2019 年北洛河上游流域植被覆盖度分布

Fig. 2 Distribution of vegetation coverage in the upper reaches of Beiluo River watershed in 1990, 2000, 2010 and 2019

表 1 北洛河上游流域 4 个时期不同植被覆盖度特征

Table 1 Characteristics of vegetation coverage in four periods of the upper reaches of Beiluo River watershed								
植被覆盖度等级	1990 年		2000 年		2010 年		2019 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
低覆盖度	908.29	26.25	206.97	6.07	32.11	0.94	80.09	2.35
中低覆盖度	2153.90	63.20	1400.64	41.10	421.42	12.37	678.98	19.92
中等覆盖度	312.72	9.18	1563.29	45.87	1517.37	44.52	461.87	13.55
中高覆盖度	28.50	0.84	224.97	6.60	1135.90	33.33	971.14	28.50
高覆盖度	4.58	0.13	12.13	0.36	301.20	8.84	1215.91	35.68

2.2 北洛河上游植被覆盖度动态变化特征

对流域 4 期植被覆盖度分布图进行差值运算,得到 1990—2019 年北洛河上游流域植被覆盖度空间变化及其演变特征(图 3、表 2)。根据我国退耕还林还草工程实施进展,结合研究区的实际状况,将退耕还林还草工程在流域的实施过程划分为探索试点期(1990—2000 年)、建设期(2000—2010 年)和巩固期(2010—2019 年)3 个阶段。结果显示,在探索试点期,流域植被以改善为主(改善区面积占比为 78.3%,稳定区面积占比为 15.58%,退化区面积占比仅为 6.12%)。这一时期由于国家在前期探索的基础上于 1998 年开始了退耕还林还草试点工程,流域内以吴起县为代表的县域短期内全面实施了封山禁牧、植树种草等措施,使得流域植被覆盖度整体快速提升。在建设期,流域植被持续改善(改善区面积占比为 80.02%,稳定区面积占比为 13.63%,退化区面积占比为 6.36%)。这期间国家退耕还林还草工程在试点成功的基础上全面启动,持续不断的财政投入,使得该区生态环境改善与产业结构调整得到协同推进,流域整体植被生态质量持续向好。在巩固期,流域植被

总体仍以改善为主(改善区面积占比为 61.43%),但局部地区退化严重(退化区面积占比为 25.96%),退化植被主要分布在流域西北部。这一时期随着退耕还林还草工程任务的改变,植被退化可能与流域自身的自然条件限制和大量人工植被建设有关。总体来看,1990—2019 年 30 a 间流域植被大幅提升(改善区面积占比为 90.46%,稳定区及退化区面积占比分别为 5.6%和 3.95%),以强烈改善为主(面积占比为 74.32%),且分布在流域东南部吴起县域。

研究期间,流域各等级植被覆盖度类型的转移速度及状态指数见表 3,1990—2019 年,转入速度最高的等级为高覆盖度(9.13),其次为中高覆盖度(1.17),而转出速度最高的等级为低覆盖度(0.05),其次为中低覆盖度(0.04);与此同时,中等、中高及高覆盖度等级的状态指数均为负值,表明这些等级的植被覆盖度面积随时间演替呈扩大态势,且扩大态势最明显的等级为高覆盖度;低及中低覆盖度等级的状态指数大于 0,说明该等级下的植被覆盖度面积随时间演替呈缩小态势,并以低覆盖度等级面积的缩小态势较为明显。

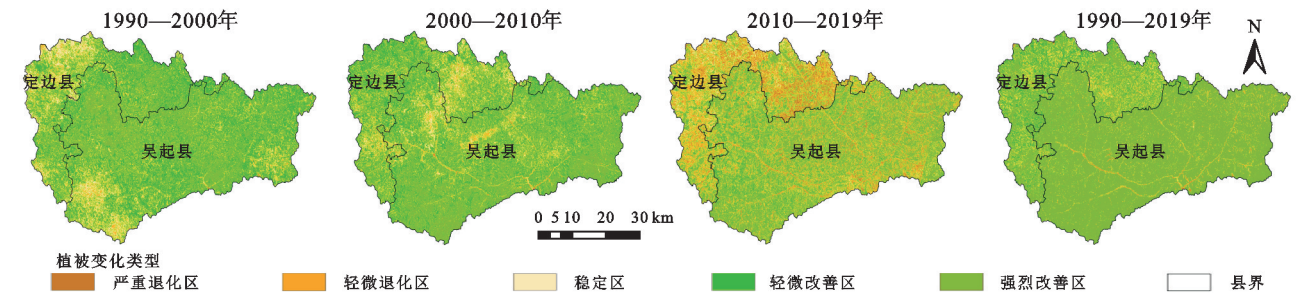


图 3 1990—2019 年北洛河上游流域植被覆盖度变化分级

Fig. 3 Classification of vegetation coverage changes in the upper reaches of Beiluo River watershed from 1990 to 2019

表 2 北洛河上游流域植被覆盖度空间变化统计

Table 2 Statistics of vegetation coverage changes in the upper reaches of Beiluo River watershed					
植被覆盖度变化等级	分级标准/%	植被覆盖度变化面积占比/%			
		1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2019 年	1990—2019 年
强烈改善区	≥20	29.34	36.09	37.10	74.32
轻微改善区	[5,20)	48.96	43.93	24.33	16.14
稳定区	[−5,5)	15.58	13.63	12.62	5.60
轻微退化区	[−20,−5)	4.94	4.71	15.13	3.00
严重退化区	<−20	1.18	1.65	10.83	0.95

表 3 北洛河上游流域 1990—2019 年各等级植被覆盖度面积转移速度及状态指数

Table 3 Conversion rate and state index of vegetation coverage in the upper reaches of Beiluo River watershed from 1990 to 2019

等级	1990—2000 年			2000—2010 年			2010—2019 年			1990—2019 年		
	转入速度	转出速度	状态指数	转入速度	转出速度	状态指数	转入速度	转出速度	状态指数	转入速度	转出速度	状态指数
低覆盖度	0.01	0.09	0.79	0.01	0.10	0.80	0.24	0.08	−0.51	0.01	0.05	0.90
中低覆盖度	0.03	0.06	0.40	0.01	0.08	0.77	0.12	0.05	−0.42	0.01	0.04	0.68
中等覆盖度	0.44	0.04	−0.83	0.05	0.06	0.03	0.02	0.09	0.71	0.05	0.03	−0.21
中高覆盖度	0.74	0.05	−0.88	0.46	0.05	−0.79	0.07	0.08	0.11	1.17	0.03	−0.96
高覆盖度	0.25	0.08	−0.50	2.45	0.07	−0.95	0.38	0.04	−0.79	9.13	0.02	−1.00

2.3 北洛河上游流域植被覆盖度的地形因子分异特征

2.3.1 北洛河上游植被覆盖度随高程的变化特征

高程在一定程度上反映人类活动的干扰程度,并通过影响区域水热条件,进而影响植被生长。由表 4 可以看出,流域 92.66%的面积集中分布在 1 400~1 700 m 高程带。总体上,植被覆盖度随高程的升高呈降低趋势。1990 年,植被覆盖度随着高程的升高不断降低,最高值出现在低于 1 300 m 的高程带;而在 2000 年、2010 年、2019 年,植被覆盖度随高程的上升呈先升高后降低的特征,最高值出现在 1 300~1 500 m 的高程带。这是因为流域内高程较低的地区,水热条件较好,植被易于生长,而高程相对较高的区域,气候较为干燥,植被生长条件较差,因此植被覆盖随高程升高而降低。但随着城市建设用地扩张,2000 年以来,低海拔区域呈现较低的植被覆盖度。

表 4 1990—2019 年北洛河上游流域不同高程植被覆盖度

Table 4 Vegetation coverage at different elevations in the upper reaches of Beiluo River watershed from 1990 to 2019

高程/m	面积	植被覆盖度/%			
	占比/%	1990 年	2000 年	2010 年	2019 年
<1300	0.05	28.31	28.32	15.69	19.89
1300~1400	4.16	23.95	39.59	52.08	56.71
1400~1500	25.60	18.66	35.05	51.54	64.68
1500~1600	44.82	16.15	30.74	48.10	58.98
1600~1700	22.24	15.33	25.80	42.91	49.13
1700~1800	2.80	15.05	20.61	35.67	35.00
>1800	0.33	14.03	18.45	31.75	24.10

2.3.2 北洛河上游流域植被覆盖度随坡度的变化特征

坡度通过改变物质能量流动的方向和方式来影响植被覆盖状况。由表 5 可知,流域 93.18%的面积主要分布在 5°~35°坡度带。随着坡度的升高,流域植被覆盖度逐渐增加,最低值出现在 0°~5°的坡度带,最高值出现在高于 35°的坡度带。这主要是因为地势较缓的地区人类活动干扰影响大,植被覆盖度较差,相反,坡度越陡的区域,人类活动干扰受限,植被覆盖度相对增加。从不同坡度带植被覆盖度变化来看,>25°的坡度带是植被覆盖度增幅最为显著的区域,1990—2019 年 30 a 间该坡度带

植被覆盖度增幅为 48.4%~49.9%。

表 5 1990—2019 年北洛河上游流域不同坡度植被覆盖度

Table 5 Vegetation coverage at different slopes in the upper reaches of Beiluo River watershed from 1990 to 2019

坡度/(°)	面积	植被覆盖度/%			
	占比/%	1990 年	2000 年	2010 年	2019 年
0~5	6.21	16.44	30.17	46.24	51.51
5~8	9.14	16.46	30.38	46.47	52.09
8~15	31.96	16.71	30.49	46.81	54.06
15~25	40.67	16.82	30.93	48.13	59.58
25~35	11.41	17.46	31.49	49.31	65.88
>35	0.61	17.52	31.66	49.87	67.45

2.3.3 北洛河上游流域植被覆盖度随坡向的变化特征

坡向主要通过光照影响水分及热量条件进而改变植被的生长状况。由表 6 可以看出,流域内 99.63%的面积为阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡,且其面积占比相近。植被覆盖度随坡向遵循阴坡>半阴坡>平地>半阳坡>阳坡的分布规律。出现这种现象的主要原因是坡向通过影响水热组合条件为植被生长提供了不同的生长环境,阴坡与阳坡有着不同的水热条件。同纬度条件下,由于阴坡接受的太阳辐射总量小于阳坡,故其水分条件较好,因此植被覆盖度随坡向的变化呈现出一定的差异性,表现为阴坡植被覆盖度最高,其次为半阴坡,平地和半阳坡随后,阳坡的植被覆盖度最低。

表 6 1990—2019 年北洛河上游流域不同坡向植被覆盖度

Table 6 Vegetation coverage at different aspects in the upper reaches of Beiluo River watershed from 1990 to 2019

坡向	面积	植被覆盖度/%			
	占比/%	1990 年	2000 年	2010 年	2019 年
平地	0.38	17.34	31.23	49.17	57.97
阴坡	23.97	18.38	32.87	51.25	59.13
半阴坡	25.99	18.21	32.13	49.94	59.02
半阳坡	25.98	16.29	30.50	46.38	56.83
阳坡	23.69	15.39	29.51	43.39	53.30

3 讨论

研究结果显示,1990 年、2000 年、2010 年、2019



年北洛河上游流域平均植被覆盖度分别为 16.82%, 30.79%, 47.57%, 57.41%, 可以看出, 植被覆盖度从退耕还林还草工程实施前(1990 年)的 16.82% 增长至近期(2019 年)的 57.41%, 呈持续增长趋势, 增幅为 241.32%, 与此同时, 退耕还林还草工程实施以后高等级植被覆盖度面积占比大幅增加, 表明退耕还林还草工程的实施极大地改善了流域植被覆盖状况。这与郭永强<sup>[9]</sup>和赵安周<sup>[25]</sup>等的研究结果一致, 其研究表明, 与退耕还林还草工程实施前相比, 退耕还林还草工程实施后黄土高原年均植被覆盖度增速显著, 植被覆盖度显著增加的区域主要位于黄土高原丘陵沟壑区生态工程重点建设的地区。本研究区植被覆盖度在空间上呈现东南高、西北低的分布特征, 且这种分布特征在 2000 年以后更为突显。究其原因, 一方面, 黄土高原植被覆盖度的空间分布与降水量显著相关, 北洛河上游流域地处半干旱气候区, 多年平均降水量约 410 mm<sup>[17]</sup>, 水分条件是制约黄土高原植被生长极为重要的影响因素<sup>[26]</sup>, 研究区降水量从东南向西北逐渐递减, 降水量的变化会影响土壤水分状况, 进而导致植被生长状况发生改变, 因此降水量的空间分布在一定程度上决定了研究区植被覆盖度的空间分布。另一方面, 退耕还林还草工程实施强度是影响该区植被覆盖度空间差异的主要因素。吴起县 1998 年率先开始实施封山退耕、植树种草等政策, 1999 年全年一次性退耕面积达 1 036.67 km<sup>2</sup>, 占全县总面积的 27.35%, 是全国封得最早、退得最快、退耕面积最大的县份<sup>[27]</sup>。退耕政策反映出人类活动对土地利用的影响程度, 这一时期该县的土地利用程度综合指数变化幅度尤为显著<sup>[16]</sup>, 呈现出与周围县域鲜明的差异, 因此 2000 年以后, 流域东南部以吴起县为代表的区域植被覆盖度明显高于西北部。

1990—2019 年, 流域植被覆盖度整体明显改善, 相比于退耕还林探索试点期和建设期而言, 退耕还林巩固期, 流域局部地区植被退化严重(退化区面积占比为 25.96%), 退化植被大面积分布在西北部定边县。这与刘逸滨等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。导致植被退化的因素是多方面的。首先, 流域东南部地势较低, 水热条件相对较好, 因此东南部植被恢复效果较好, 而西北部大多为北洛河水源发源区、山高坡陡、降水量减少, 温度降低, 植被恢复效果较差甚至出现退化。其次, 自退耕还林还草试点工程启动以来, 持续高强度的人力物力投入很大程度上削弱了气候因素对植被的不利影响, 而在之后的巩固期, 退耕还林的主要任务是造林地养护管理及小面积补植补造工作, 因此巩固期, 西北部较差的水热条件不利于人工植被的生

长发育, 导致该区植被出现退化。此外, 流域植被退化可能与大面积人工植被建设有关。已有研究指出, 在气候变暖的趋势下, 黄土高原大规模植被建设引起区域蒸散耗水增加, 加剧了土壤干燥化程度, 导致人工植被生长到一定时间开始退化<sup>[29]</sup>。因此, 今后对于植被的恢复与重建需加强前期实施方案的合理性论证, 如植被类型、种植密度及规模等需根据相应的区域蒸散耗水特征和土壤水分植被承载力来确定, 以应对未来气候变化对区域植被建设的威胁, 从而提高植被生态系统的可持续发展。

地形通过改变生境要素影响植被的生长及演替。流域植被覆盖度随地形因子的变化呈现出明显的分异特征, 这与前人的研究结果相似<sup>[14-15]</sup>。值得注意的是, 研究区植被覆盖度随着高程的升高呈降低趋势, 但自 2000 年以来, 水热条件相对较好的低海拔地区呈现出较低的植被覆盖度。这是由于低海拔地区往往是城市建设用地的集中分布区, 在 1998 年流域开始实施退耕还林还草工程以来, 随着农村人口向城镇迁移, 导致流域内城市建设用地面积呈扩张趋势, 并且主要分布在地势较低的高程带<sup>[17]</sup>, 因此低海拔区域呈现出较低的植被覆盖度。此外, 2000 年以来, 15°以上的坡度带是流域植被覆盖度增幅明显的区域, 并以 25°以上坡度带的增幅最显著。主要原因是退耕还林政策的实施将坡耕地转变为林草地, 以减轻水土流失, 坡度作为退耕政策执行的首要标准, 即 25°以上的陡坡耕地应退尽退, 同时也将 15°~25°的坡耕地纳入其中, 因此在退耕还林还草工程实施以后, 15°以上的坡度带植被覆盖度大幅增加, 尤其以 25°以上坡度带的增幅最为显著。由此可见, 退耕还林工程引起的土地利用变化是流域植被覆盖度变化的主要驱动方式, 实施退耕政策使得流域陡坡耕地转化为林草地, 从而导致陡坡区植被覆盖度增幅显著, 这与刘宇<sup>[11]</sup>和张宝庆<sup>[12]</sup>等对黄土高原植被覆盖度变化的地形分异特征研究结果一致。研究显示, 北洛河上游流域未来植被覆盖度仍有 9.2% 的提升幅度<sup>[30]</sup>, 由于该流域植被分区处于典型草原带, 因此, 未来该区域植被恢复除了在水分条件较好的微地形植树造林外, 需重点考虑以低耗水的乡土灌草种为主的自然恢复方式。

本研究基于多时相遥感影像, 结合数字高程模型数据, 从流域视角分析探讨了退耕还林还草工程实施背景下黄土丘陵沟壑区流域植被覆盖度时空变化及其地形分异特征, 研究结果可为该地区植被监测与保护提供科学参考。但本文还存在一些不足之处, 首先, 在植被覆盖度计算上, 本研究采用 NDVI 值结合像元二分模型进

行了研究区植被覆盖度的估算,尽管该模型在实践中应用广泛,但对于模型中  $NDVI_{soil}$  和  $NDVI_{veg}$  的取值大多根据  $NDVI$  值的频率累计分布确定,缺乏对计算结果进行多源遥感数据集的互相验证,或对不同混合像元模型估算精度的对比与评价。另外,本文未能引入气象数据、土壤质地数据、土地利用数据及社会经济数据等对植被覆盖度时间变化及空间分异的主导因素进行定量分析,如何分离量化不同影响因素对植被覆盖度变化的作用需进一步深入研究。

## 4 结论

(1) 流域植被覆盖度在空间上呈现东南高、西北低的分布特征。1990—2019 年流域植被覆盖度从退耕还林还草工程实施前(1990 年)的 16.82% 增加到近期(2019 年)的 57.41%,呈持续增加趋势,尤其退耕还林还草工程实施以后高等级植被覆盖度面积占比大幅提升,1990 年、2000 年、2010 年、2019 年高等级植被覆盖度面积占比分别为 0.97%、6.96%、42.17%、64.18%。

(2) 在退耕还林还草工程实施的各个时期,流域植被覆盖度总体持续改善,西北局部地区出现退化,流域东南部较西北部改善程度显著。研究期间流域植被覆盖度结构明显改善,中高及高植被覆盖度的面积以转入为主,中低及低植被覆盖度的面积以转出为主,中等及以上等级植被覆盖度面积随着时间演替呈扩大态势,以高植被覆盖度面积扩张态势最为明显。

(3) 流域植被覆盖度在地形上存在明显的分异特征。植被覆盖度随着高程的增加呈减小趋势。植被覆盖度与坡度呈正相关,即坡度越陡,植被覆盖度越大,植被覆盖度随坡向遵循阴坡>半阴坡>平地>半阳坡>阳坡的分布规律。2000 年以来,退耕还林还草工程的实施使得流域 25° 以上陡坡区植被覆盖度增幅显著,同时低海拔区出现植被覆盖度下降趋势。

### 参考文献(References):

- [1] 孙红雨,王长耀,牛铮,等.中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于 NOAA 时间序列数据[J].遥感学报,1998,2(3):204-210.  
Sun H Y, Wang C Y, Niu Z, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between  $NDVI$  and environmental factors by using NOAA time series data[J]. Journal of Remote sensing, 1998, 2(3): 204-210.
- [2] He L, Guo J B, Jiang Q O, et al. How did the Chinese Loess Plateau turn green from 2001 to 2020: An explanation using satellite data[J]. Catena, 2022, 214: 106246.
- [3] 胡海涛,畅易飞,王凯博.2000—2020 年陕西省植被覆盖时空变化多尺度分析[J].水土保持研究,2023,30(3):345-352.  
Hu H T, Chang Y F, Wang K B. Multi-scale analysis of

spatiotemporal change of vegetation cover in Shaanxi Province from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 345-352.

- [4] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.  
Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 166-174.
- [5] 赵婷,白红英,邓晨晖,等.2000—2016 年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应[J].生态学报,2019,39(12):4499-4509.  
Zhao T, Bai H Y, Deng C H, et al. Topographic differentiation effect on vegetation cover in the Qinling Mountains from 2000 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4499-4509.
- [6] Zhao A Z, Zhang A B, Lu C Y, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Program in Loess Plateau China[J]. Ecological Engineering, 2017, 104: 13-22.
- [7] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reducing sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.
- [8] 李登科,王钊.退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J].生态学杂志,2020,39(1):1-10.  
Li D K, Wang Z. Changes of fractional vegetation coverage after returning farmland to forests and its response to climate in Shaanxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 1-10.
- [9] 郭永强,王乃江,褚晓升,等.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,2019,39(11):4804-4811.  
Guo Y Q, Wang N J, Chu X S, et al. Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine[J]. China Environmental Science, 2019, 39(11): 4804-4811.
- [10] 刘志红,郭伟玲,杨勤科,等.近 20 年黄土高原不同地貌类型区植被覆盖变化及原因分析[J].中国水土保持科学,2011,9(1):16-23.  
Liu Z H, Guo W L, Yang Q K, et al. Vegetation cover changes and their relationship with rainfall in different physiognomy type areas of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(1): 16-23.
- [11] 刘宇,傅伯杰.黄土高原植被覆盖度变化的地形分异及土地利用/覆被变化的影响[J].干旱区地理,2013,36(6):1097-1102.  
Liu Y, Fu B J. Topographical variation of vegetation cover evolution and the impact of land use/cover change in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(6): 1097-1102.
- [12] 张宝庆,吴普特,赵西宁.近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293.



- Zhang B Q, Wu P T, Zhao X N. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982—2009[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 287-293.
- [13] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 205-212.
- Zhao G J, Mu X M, Tian P, et al. Prediction of vegetation variation and vegetation restoration potential in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 205-212.
- [14] 杨灿, 魏天兴, 李亦然, 等. 黄土高原典型县域植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1830-1838.
- Yang C, Wei T X, Li Y R, et al. Spatiotemporal variations and topographic differentiation of fractional vegetation cover in typical counties of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1830-1838.
- [15] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1158-1167.
- Yin D D, Wang Y H. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and its topographic differentiation in temperate continental semi-arid monsoon climate region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1158-1167.
- [16] 邹亚东, 何亮, 张晓萍, 等. 基于 GEE 数据平台的北洛河流域 1970—2019 年土地利用结构变化特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 209-219.
- Zou Y D, He L, Zhang X P, et al. Characteristics of land use structure change in Beiluo River basin during 1970—2019 based on google earth engine[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 209-219.
- [17] 陈浩. 黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- Chen H. Spatial and Temporal Changes of Soil Erosion and Its Driving Factors Before and After the 'Grain for Green' Project in the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [18] 罗舒元, 朱清科, 辛云玲, 等. 陕北吴起县植被覆盖度时空特征及其影响机制[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(3): 146-154.
- Luo S Y, Zhu Q K, Xin Y L, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation coverage and its influencing mechanism in Wuqi County, northern Shaanxi Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3): 146-154.
- [19] Zhang X P, Lin P F, Chen H, et al. Understanding land use and cover change impacts on run-off and sediment load at flood events on the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(4): 576-589.
- [20] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- Li M M, Wu B F, Yan C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. Resources Science, 2004, 26(4): 153-159.
- [21] 陈妮, 李谭宝, 张晓萍, 等. 北洛河流域植被覆盖度时空变化的遥感动态分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 206-210.
- Chen N, Li T B, Zhang X P, et al. Spatiotemporal variations of vegetation coverage in Beiluo River watershed based on remote sensing data analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 206-210.
- [22] 李恒凯, 刘小生, 李博, 等. 红壤区植被覆盖变化及与地貌因子关系: 以赣南地区为例[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 103-109.
- Li H K, Liu X S, Li B, et al. Vegetation coverage variations and correlation with geomorphologic factors in red soil region: A case in South Jiangxi Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(1): 103-109.
- [23] 仙巍, 邵怀勇, 周万村. 嘉陵江中下游地区近 30 年土地利用与覆被变化过程研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2): 114-121.
- Xian W, Shao H Y, Zhou W C. Process of land use/land cover change in the area of middle and lower reach of Jialingjiang River[J]. Progress in Geography, 2005, 24(2): 114-121.
- [24] 汤巧英, 戚德辉, 宋立旺, 等. 基于 GIS 和 RS 的延河流域植被覆盖度与地形因子的相关性研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 198-203.
- Tang Q Y, Qi D H, Song L W, et al. Correlation of vegetation coverage and topographic factors in Yanhe River basin based on GIS and RS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 198-203.
- [25] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460.
- Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green project in the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 449-460.
- [26] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- Guo Z S, Shao M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [27] 郭建英. 吴起县退耕还林工程效益的监测与评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- Guo J Y. Research on Monitoring and Benefit Evaluation of Project for Conversion of Cropland to Forestry in Wuqi County[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.

态系统韧性时空分异:以宁夏为例[J].干旱区研究, 2023,40(2):303-312.

Yang H, Hou J W, Ma C H, et al. Spatio-temporal differentiation of the composite ecosystem resilience in the ecologically fragile area in the upper reaches of the Yellow River: A case study in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2023,40(2):303-312.

[24] 丁金梅,王维珍,米文宝,等.宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素[J].生态学报,2023,43(5):1913-1922.

Ding J M, Wang W Z, Mi W B, et al. Spatial characteristics and influencing factors of soil organic carbon in grassland in Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(5):1913-1922.

[25] Wallis J R, Matalas N C. Small Sample Properties of H and K-Estimators of the Hurst Coefficient h[J]. Water Resources Research, 1970,6(6):1583-1594.

[26] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.

Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. Relationship between vegetation cover change and climate and human activities on the Loess Plateau [J]. Resource Science, 2014, 36 (1):166-174.

[27] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(4):535-554 .

[28] 刘洋洋,任涵玉,章钊颖,等.中国草地覆盖度时空动态格局及其影响因素[J].水土保持研究,2022,29(2):221-230,242.

Liu Y Y, Ren H Y, Zhang Z Y, et al. Temporal and spatial dynamic pattern of grassland coverage and its influencing factors in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):221-230,242.

[29] 秦格霞,芦倩,孟治元,等.1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):101-108,117.

Qin G X, Lu Q, Meng Z Y, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NDVI and its response to climate change in northern China from1982 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):101-108,117..

[30] 张江,袁旻舒,张婧,等.近 30 年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应[J].生态学报,2020,40(18):6269-6281.

Zhang J, Yuan M S, Zhang J, et al. Responses of the NDVI of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau to climate change and human activities over the last 30 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(18):6269-6281.

(上接第 218 页)

[26] 赵文玥,李阳兵,李媛媛,等.三峡库区腹地撂荒地动态演变及景观格局:以重庆市奉节县平安乡、竹园镇为例[J].水土保持通报,2018,38(3):256-262.

Zhao W Y, Li Y B, Li Y Y, et al. Evolution and landscape pattern of abandoned land in center region of Three Gorges Reservoir area: A case study in Ping'an and Zhuyuan township of Fengjie County, Chongqing municipality[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(3):256-262.

[27] 米吾作.论凉山彝族移民扶贫[J].西南民族学院学报:哲学社会科学版,2000,21(S3):13-17.

Mi W Z. On poverty alleviation of Yi immigrants in Liangshan[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Philosophy and Social Sciences, 2000,21(S3):13-17.

[28] Li S F, Li X B. Global understanding of farmland abandonment: A review and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017,27(9):1123-1150.

(上接第 227 页)

[28] 刘逸滨,刘宝元,成城,等.退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度时空变化及影响因素分析[J].水土保持学报,2022,36(2):197-208.

Liu Y B, Liu B Y, Cheng C, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation coverage in Yulin City during the past 20 years since the implementation of the “Grain for Green” program[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):197-208.

[29] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.

Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016,31(1):14-22.

[30] 易海杰,张晓萍,何亮,等.黄土高原不同地貌类型区植被恢复潜力及其土地利用变化[J].农业工程学报,2022,38(18):255-263.

Yi H J, Zhang X P, He L, et al. Vegetation restoration potential and land use change in different geomorphological areas of the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(18):255-263.