

马小红,林菲,原黎明,等.2000—2020年汾河流域植被覆盖度变化及其对生态工程的响应[J].中国沙漠,2023,43(3):86–95.

2000—2020年汾河流域植被覆盖度变化及其对生态工程的响应

马小红^{a,b},林菲^b,原黎明^b,牛俊杰^b

(太原师范学院 a.山西省城乡统筹协同创新中心, b.汾河流域科学发展研究中心, 山西 晋中 030619)

摘要: 植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在干旱半干旱地区的荒漠化防治及水土保持过程中起着至关重要的作用。植被覆盖度则是衡量植被及生态环境状况的重要指标。为了解2000—2020年汾河流域的植被覆盖及生态环境状况,分析了植被覆盖度的空间格局及其变异特征、探讨了植被覆盖度对生态工程的响应关系。结果表明:(1)汾河流域的植被覆盖度呈增加趋势,从2000年的55%增加到2020年的72%,年增加速率为0.87%,主要表现为高和极高植被覆盖度(>60%)区域面积的增加。汾河流域的生态环境质量得到了极大的改善。(2)在生态工程的影响下,植被覆盖度呈增加的区域面积高达77.1%;而受城镇化及矿产资源开发的影响,有1.7%的区域植被覆盖度呈减小趋势。(3)汾河流域植被覆盖度的时空变异性强,变异系数在0.01~2.20范围波动,仅原有高山林区、河谷农业区及城镇建设区的植被较为稳定。该研究能够为制定生态环境保护和可持续发展相关政策提供一定的理论依据。

关键词: 汾河流域; 植被覆盖度; 生态工程

文章编号: 1000-694X(2023)03-086-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00144

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

0 引言

植被,作为陆地生态系统的重要组成部分,是连接土壤、水体和大气之间物质和能量交换的关键环节^[1],对气候变化和人类活动的响应十分敏感。在气候变化背景下,随着人类活动的加剧,植被的生长必然会受到影响。尤其是在干旱半干旱地区,生态环境比较脆弱,人类活动极易对地表植被产生影响,而植被在控制水土流失、改善生态环境方面起着极为重要的作用^[2-4]。因此,在生态环境脆弱的干旱半干旱地区,研究植被的时空演变规律及其对人类活动的响应机理具有重要的生态价值。植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage, FVC)作为反映植被生长状况、分布特征及结构变化的良好指标,被广泛用于分析植被变化特征及其影响机理^[5-6]。

自20世纪90年代末期,为解决环境危机,改善人类福祉,中国政府实施了一系列的生态工程,如

天然林保护工程、退耕还林还草工程、三北防护林体系建设工程、环京津风沙源治理工程、黄河中游森林保护工程等;其中黄土高原地区重点实施的工程有退耕还林还草工程和天然林保护工程^[7-8]。生态工程实施后,黄土高原地区的植被覆盖度显著提高、水土流失得到了有效控制^[9-11]。针对黄土高原地区植被覆盖度的时空变化特征及其响应机理,学者们已开展了一系列卓有成效的研究。研究发现:①2000年之后,区域尺度上黄土高原地区的植被覆盖度呈显著的增加趋势^[12],像元尺度上有少部分区域植被覆盖度呈降低趋势^[5-6];②黄土高原地区人类活动对植被变化的贡献大于气候变化^[13-14],生态工程是造成该区域植被覆盖度显著增加的主要因素^[5-6,12-13,15-17]。尽管2000年之后黄土高原地区的植被整体呈改善趋势且主要受生态工程的影响,但是在黄土高原的不同区域,植被覆盖度的变化趋势及其对生态工程的响应程度存在较大差异。因此,有必要阐明黄土高原内部不同区域植被覆盖度的变

收稿日期:2022-09-27; 改回日期:2022-11-17

资助项目:山西省应用基础研究计划面上青年基金项目(201901D211419);中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室资助项目(KLEIRB-ZS-20-05);山西省高等学校人文社会科学重点研究基地项目(20210141,20200133)

作者简介:马小红(1990—),女,甘肃定西人,博士,副教授,主要从事干旱区生态水文与碳循环研究。E-mail: maxiaohong@tynu.edu.cn

化规律及其对生态工程的响应。

汾河流域作为黄土高原东部地区独立的流域单元,其生态环境的特殊性、区域的相对封闭性,为开展植被覆盖变化及其对流域生态环境的影响研究等提供了良好的试验场地。目前关于汾河流域植被变化的研究相对较少,且集中于分析汾河流域植被覆盖度的时空变化特征^[18-22],缺少对植被变化发生机理的研究。因此,本文对汾河流域植被覆盖度的时空演变规律及其对生态工程的响应特征进行了研究,该研究能够为汾河流域的生态环境建设和管理提供一定的理论指导。

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

汾河是黄河的第二大支流,发源于山西省宁武县管涔山脉南麓,干流自北向南穿行于吕梁山和云中山之间,经汾河水库向东流经太原市兰村(上游段);经兰村向南穿越太原盆地,出介休西南流至灵石、霍州,迂回穿行在灵霍山峡间至洪洞(中游段);经洪洞向西南穿越临汾盆地,至运城市新绛县境内急转西行,于万荣县荣河镇庙前村汇入黄河(下游段)^[23]。汾河流域位于黄土高原的东部,地跨山西省的34个县市,地理位置为 $35^{\circ}20'—39^{\circ}00'N$ 、 $110^{\circ}30'—113^{\circ}32'E$,南北长约415 km,东西宽188 km,呈带状分布,流域面积约40 000 km²(图1)。汾河流域属于温带大陆性季风气候,地处半干旱和半湿润型气候过渡区,雨热同期,四季分明,冬春季节寒冷干燥、雨雪较少,夏秋季节气温较高、降水集中。流域内的土壤类型主要有棕壤、红黏土、潮土、栗钙土,黄绵土、褐土和黑垆土等,其中褐土是主要的地带性土壤,主要分布在盆地和丘陵地带^[24]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及预处理

本研究使用的数据主要包括:①2000—2020年的MODIS-NDVI遥感影像数据;②2000年和2020年的土地利用/覆被数据;③2000—2020年的植树造林面积数据。

MODIS-NDVI数据的来源和处理。选用美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的MODIS植被指数产品(MOD13A1),该产品已对遥感成像过程中产

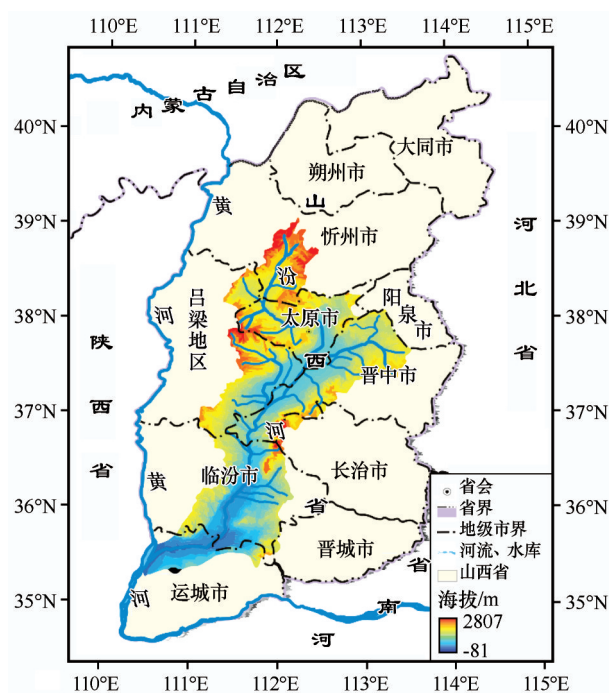


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the research area

生的边缘畸变进行了校正,是空间分辨率为500 m、16 d合成的三级正弦投影产品。为研究汾河流域植被覆盖度的时空变化格局,本文下载了2000—2020年植物生长旺季(7—8月),图幅号为H26V05和H27V05的数据产品。首先在GIS软件中对同一时段的多幅影像数据进行拼接,然后利用MODIS重投影工具将正弦曲线投影转化为横轴墨卡托投影,地理坐标设置为WGS84。最后利用相同投影的汾河流域矢量数据对其进行掩模裁剪,并通过均值处理得到2000—2020年汾河流域的MODIS-NDVI数据。

2000年和2020年的土地利用/覆被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率是30 m。该数据采用二级分类系统:一级地类包括6类,根据土地资源及其属性分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;二级地类主要根据土地资源的自然属性,分为25个类型,其中林地包括有林地、灌木林地、疏林地和其他林地,草地包括高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地^[25]。

从历年的山西省统计年鉴中得到2000—2020年植树造林的面积数据。

1.2.2 植被覆盖度的计算

基于像元二分模型,利用归一化植被指数计算

植被覆盖度^[26]:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (1)$$

式中: $NDVI_v$ 、 $NDVI_s$ 分别为纯植被和纯土壤的植被指数值; $NDVI$ 为被求像元的植被指数值。通常很多学者会根据整幅影像上 $NDVI$ 的灰度分布, 在某一置信区间内截取 $NDVI$ 的上下限阈值分别近似代表 $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ ^[27-29]。本文根据 $NDVI$ 数据的频率统计图, 取累积频率为 5% 的 $NDVI$ 值为 $NDVI_s$, 取累积频率为 95% 的 $NDVI$ 值为 $NDVI_v$ 。利用上述方法在 ArcGIS 软件中对处理后的 MODIS-NDVI 数据进行计算, 得到 2000—2020 年汾河流域的植被覆盖度, 并将其分为 5 级^[1](表 1)。

表 1 汾河流域植被覆盖度分级

Table 1 Classification of fractional vegetation coverage in Fenhe River Basin

等级	极低	低	中等	高	极高
植被覆盖度/%	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100

1.2.3 趋势分析

在像元尺度上利用最小二乘线性回归方法, 得到回归斜率, 用以表示汾河流域植被覆盖度的变化趋势:

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n i C_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n C_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中: K 为植被覆盖度变化趋势线斜率; n 为监测年数; i 为年份, $i=1, 2, \dots, n$; C_i 为第 i 年的植被覆盖度, %。若 K 为正值则表明植被覆盖度呈增加趋势; 反之则为降低趋势。采用 F 检验对变化趋势进行显著性检验, 构造 F 检验统计量为:

$$F = \frac{SSR/1}{SSE/n-2} \quad (3)$$

式中: $SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 称为回归平方和; $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 称为残差平方和; y_i 为第 i 年的植被覆盖度值, \hat{y}_i 为植被覆盖度的回归值; \bar{y} 为植被覆盖度的均值; n 为年数。根据回归斜率 (K) 及显著性水平 (P), 将变化趋势分为 5 个等级^[27]。

1.2.4 变异系数

变异系数 (C_v) 是用来衡量一组观测数中各观测

量变异程度的统计量。为研究汾河流域植被覆盖度在 2000—2020 年间相对变化 (波动) 程度, 本文计算了像元尺度上植被覆盖度随时间的变异程度, 用于评估植被覆盖度随时间变化的稳定性:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$ 为植被覆盖度的标准差; \bar{x} 为植被覆盖度的平均值。 C_v 值的大小反映了数据分布的离散性、波动性。变异系数的值越大, 表明数据分布越离散, 波动性越大, 变化越剧烈; 反之则表明数据分布越集中, 波动性小, 变化趋于稳定。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度的年际变化特征

2000—2020 年, 汾河流域的植被覆盖度整体上呈波动增加的趋势, 年增加速率为 0.87% (图 2)。2000 年之后汾河流域植被覆盖度的增加速率高于整个黄土高原地区的。郭永强等^[5]发现 2000—2015 年黄土高原植被覆盖度的年增速为 0.59%。汾河流域植被覆盖度平均为 66%, 2000 年和 2020 年分别为 55% 和 72%; 2001 年的植被覆盖度最低, 为 50%; 2018 年的植被覆盖度最高, 为 74%。2000—2013 年汾河流域的植被覆盖度呈显著增加的趋势, 平均每

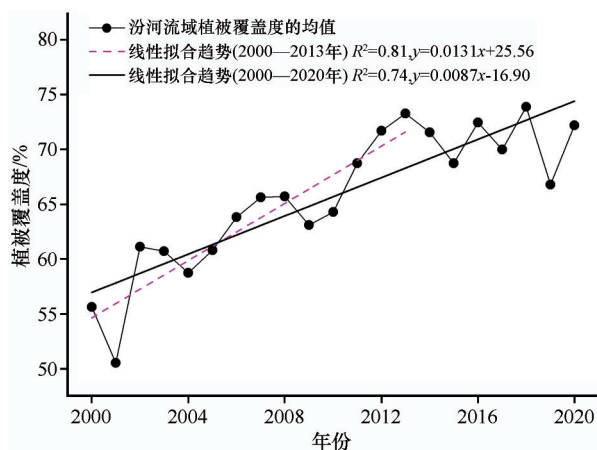


图 2 2000—2020 年汾河流域植被覆盖度的年际变化特征
Fig.2 The annual variations of fractional vegetation coverage in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

年增加 1.31%; 2013 年之后, 汾河流域的植被覆盖度在 66%~74% 波动, 无明显变化趋势。2013 年是汾河流域植被覆盖度变化的转折点。

高和极高植被覆盖区域的增加使得研究区植

被覆盖度的均值呈增加趋势。由图3可知,2000—2013年,高和极高植被覆盖区域的面积呈明显增加趋势,而低和中等植被覆盖区域的面积呈降低趋势。高和极高植被覆盖区域的增加主要受退耕还林还草工程的影响,大量陡坡地的农田变为林地和草地。由图2和图3可知,汾河流域的植被覆盖度是从2002年开始增加的,这是因为汾河流域的退耕还林还草工程是从2002年开始的。已有相关研究也表明2002年是具有转折性的年份,受退耕还林政策的影响,2002年后黄土高原地区的植被覆盖度进入迅速上升期^[30]。

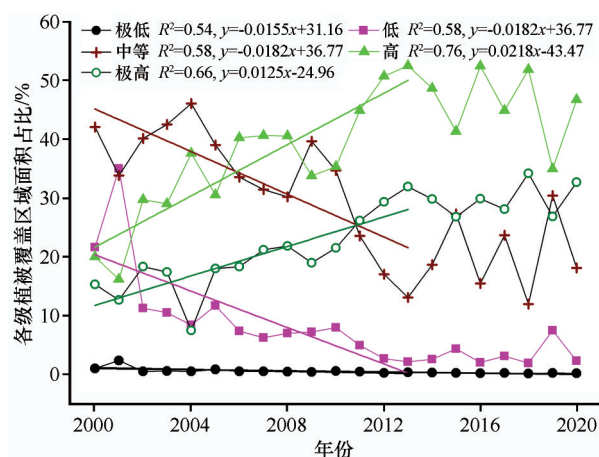


图3 2000—2020年汾河流域各级植被覆盖区域面积的年际变化特征

Fig.3 The annual variations of fractional vegetation coverage in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

2.2 植被覆盖度的空间格局及变化

2.2.1 空间格局及其演变

由图4可知2000年汾河流域山区、河谷及低山丘陵区的植被覆盖度均比较低;低和极低植被覆盖区域面积分别占汾河流域总面积的1.02%和21.60%;中等植被覆盖区域占总面积的42.09%,在山区及河谷地带均有分布;高和极高植被覆盖区域分别占总面积的19.99%和15.31%,极高植被覆盖区域主要在芦芽山国家自然保护区(1997年建)、吕梁山脉中部的关帝山国家森林公园(隶属于庞泉沟自然保护区内,1986年建)和太岳山国家森林公园(1992年建)等保护区内。到2006年,汾河中游和下游地区的植被覆盖度得到了极大的提升;2006年,极低和低植被覆盖区域面积分别占总面积的0.49%和7.39%,中等植被覆盖区域面积占总面积的33.56%。2006—2013年,汾河流域的植被状况持续

好转,汾河上游山区的中等植被覆盖区域基本转为较高植被覆盖区域,然而汾河中游的介休、灵石、霍州、汾西地区(霍西煤田)受矿产资源开发的影响植被覆盖度处于中等水平;极低、低和中等植被覆盖区域面积分别占总面积的0.34%、2.15%和13.11%,植被覆盖度大于60%的区域占流域总面积的84.40%。2013—2020年,植被覆盖度的空间格局变化不大,仅表现为上游河谷地带、中游太原盆地及南部山区、下游临汾盆地的中等植被覆盖区域稍有增加。2020年,高和极高植被覆盖区域面积占总面积的46.74%和32.66%;中等植被覆盖区域面积占总面积的18.11%,主要分布在汾河上游和下游河谷地带;低和极低植被覆盖区域面积占总面积的2.30%和0.19%,主要为建设用地。

2.2.2 空间变化趋势及稳定性

利用最小二乘线性回归方法逐像元分析植被覆盖度的变化趋势,得到2000—2020年汾河流域植被覆盖度的空间变化格局(图5)。经统计,回归斜率 K 的值域为 $-0.059 \sim 0.051$,植被变化趋势存在明显的空间差异(图6)。2000—2020年流域内绝大部分地区的植被覆盖度呈增加趋势,显著增加和极显著增加的区域面积分别为3 931 km²和2 6951 km²,分别占总面积的9.8%和67.3%;而极显著减少和显著减少的区域面积分别为453 km²和237 km²,分别占总面积的1.1%和0.6%(表2)。显著和极显著增加的区域主要分布在国家自然保护区外的其他山区和丘陵地带,如汾河下游吕梁山和太岳山南麓的低山丘陵地区、孤峰山地区,汾河中游除太岳山国家自然保护区外的其他山区,汾河上游太原盆地周边山地等。植被退化的区域主要在城区,这是由城市化过程中其他类型转化为建筑用地导致的,并不是生态环境退化的体现。再者,受矿产资源开发的影响,汾河中游汾西—霍州地区的植被覆盖度减少。汾河流域的部分山区,如中东部太岳山、西北部关帝山及芦芽山的北部,一直以来森林覆盖率较高,研究期间植被覆盖度的变化不显著。太原盆地和临汾盆地的部分地区,由于多年来一直为农业区,植被覆盖度的变化也不显著。汾河流域覆盖度变化不显著的区域面积为8 475 km²,占总面积的21.2%。

汾河流域的植被覆盖度存在明显的时空变异性,变异系数0.01~2.02。在空间尺度上:①山地森林覆盖区域如太岳山、关帝山、芦芽山等国家级自然保护区和省级森林公园以及盆地农田覆盖区域如太原

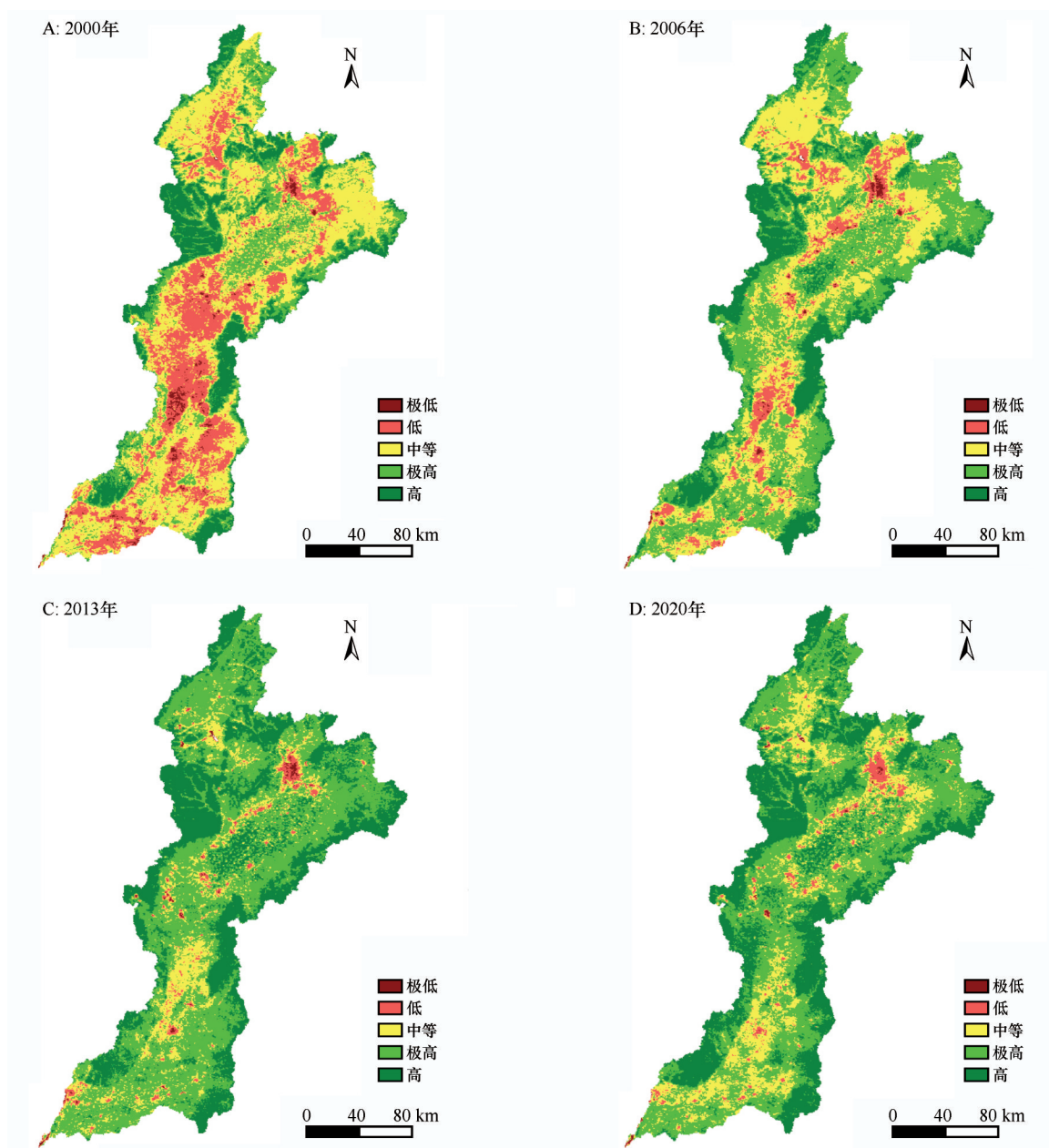


图4 汾河流域植被覆盖度的空间分布格局及变化

Fig.4 The spatial distribution pattern and variations of fractional vegetation coverage in Fenhe River Basin

盆地和临汾盆地部分地区,植被覆盖度的变异小,生态系统处于稳定状态;②太原盆地以南的汾河中游地区如交口、介休、灵石、霍州、汾西地区,植被覆盖度的变异系数大,矿区生态环境得到极大的改善,植被覆盖度呈极显著增加趋势;③汾河下游山区植被覆盖度的变异系数大,植被覆盖度显著增加。

2.3 植被覆盖度对生态工程的响应

由于汾河流域位于黄土高原东部,该区域林地和草地的增加主要得益于国家实施的退耕还林还草工程。因此,本研究用2000—2020年耕地与其他

用地类型转移为林地的面积及其空间分布特征来表示生态工程效应。2000—2020年汾河流域的林地和草地面积分别增加了130 km²和744 km²,林地和草地增加的区域与植被覆盖度显著增加的区域基本一致(图5和图7)。

由图8可知,汾河流域高和极高植被覆盖区域面积与山西省的累积植树造林面积呈显著的线性相关关系($R^2=0.78$),随着造林面积的增加,高和极高植被覆盖区域面积增大。该结论与He等^[17]在黄土高原地区的研究结果一致:山西省累积植树造林面积与山西省植被指数(NDVI)呈极显著的线性相

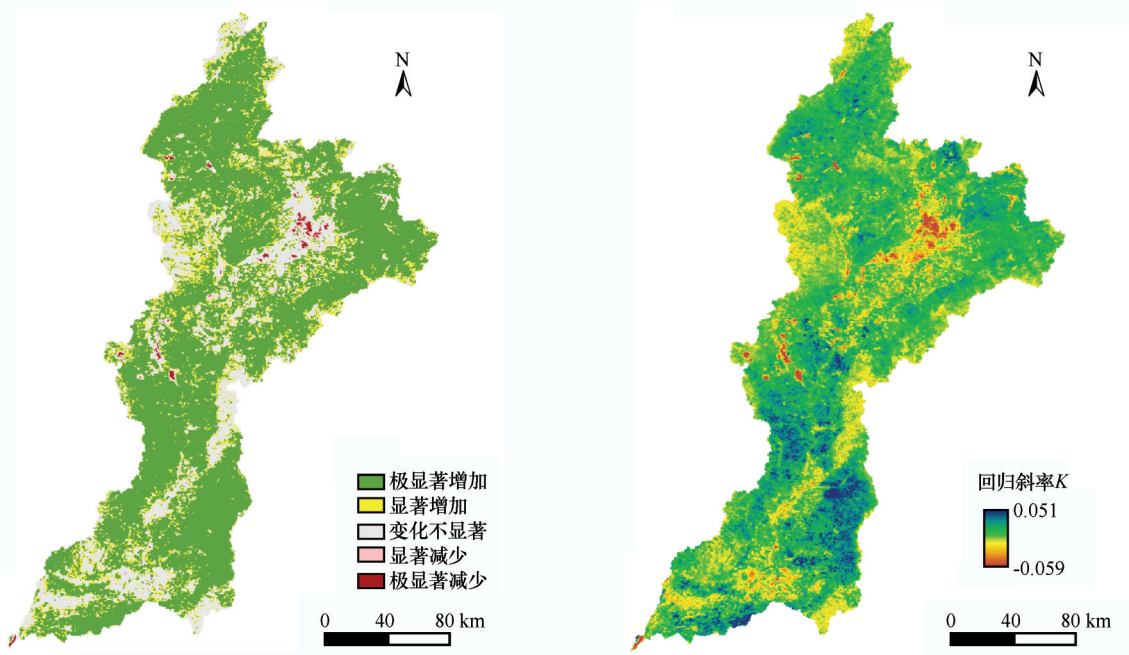


图 5 2000—2020 年汾河流域植被覆盖度的空间变化特征

Fig.5 The spatial variations of fractional vegetation coverage in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

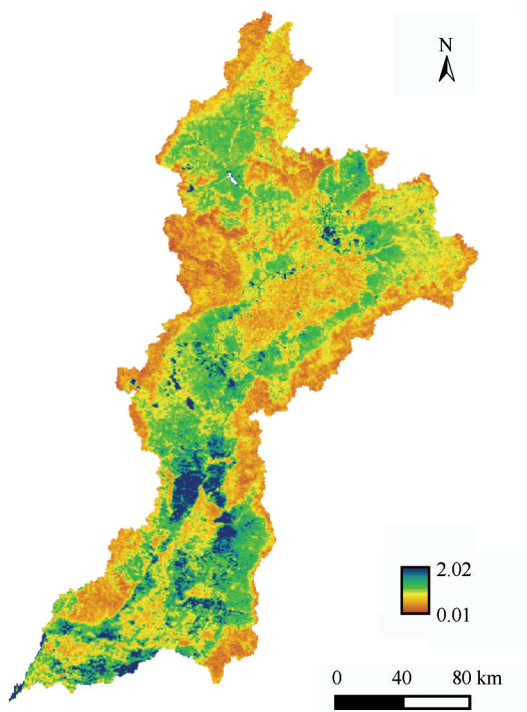


图 6 2000—2020 年汾河流域植被覆盖度的变异系数

Fig.6 The coefficient variation of fractional vegetation coverage in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

关关系($R^2=0.88$)。

3 讨论

已有研究表明虽然黄土高原地区的植被覆被状

表 2 汾河流域植被覆盖度的变化趋势		
Table 2 The change trend and its classification of fractional vegetation cover in Fenhe River Basin		
变化趋势	面积/km ²	百分比/%
极显著减少($K<0, P<0.01$)	452.9	1.1
显著减少($K<0, 0.01<P<0.05$)	237.0	0.6
变化不显著($K=0$ 或 $P>0.05$)	8 474.5	21.2
显著增加($K>0, 0.01<P<0.05$)	3 931.0	9.8
极显著增加($K>0, P<0.01$)	26 950.8	67.3

态及变化受自然和人类活动的双重影响,但是植被恢复过程主要受生态工程的影响^[5-6,12-13,15-17]。Song 等^[8]发现生态修复工程在中国的地表绿化过程中占主导地位;尤其是在山西省和陕西省,生态恢复对地表绿化的相对贡献高达 90%,远高于温度和降水变化的相对贡献。He 等^[17]发现黄土高原地区各省的植树造林面积与 *NDVI* 值呈线性相关,尤其是山西省和陕西省,相关系数分别为 0.937 和 0.911。Li 等^[13]的研究表明 1999 年退耕还林还草工程实施前后黄土高原地区植被覆盖度的变化速率相差 10 倍,不同区域的生态工程效应不同。本文对山西省汾河流域植被覆被变化的研究结果与以上结论相一致。尽管汾河流域植被的空间分布格局主要受地形、气候、土壤等自然因子的限制,在山区和丘陵地带分布有森林和草地,植被覆盖度高;在河谷地带

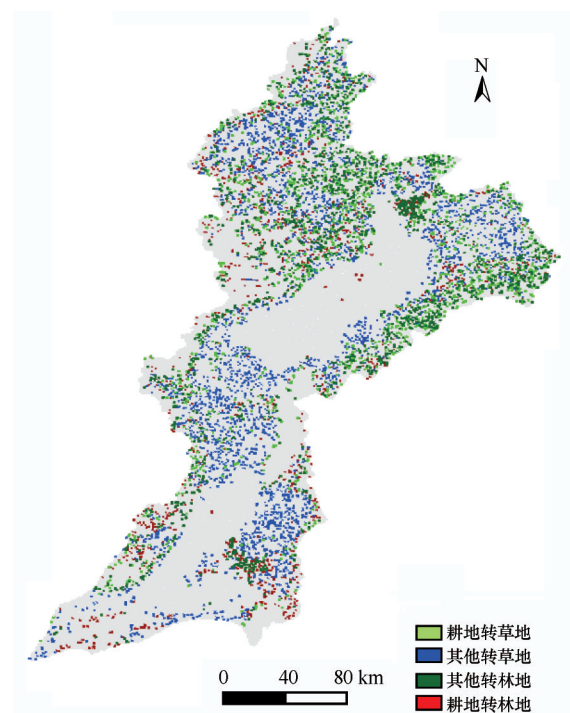


图7 2000—2020年汾河流域的生态工程效应

Fig.7 Benefits of ecological protection project in Fenhe River Basin during 2000 to 2020

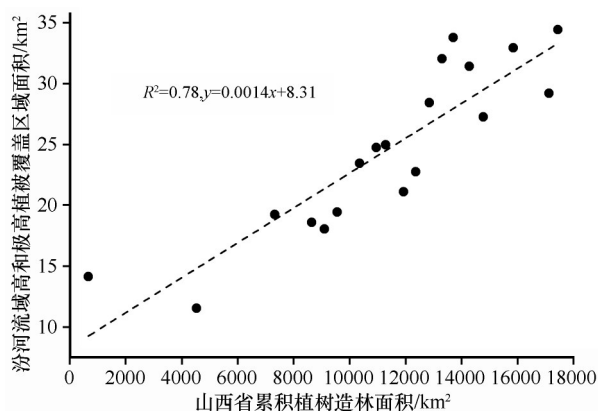


图8 2000—2020年山西省累积植树造林面积与汾河流域高和极高(FVC>60%)植被覆盖区域面积之间的关系

Fig.8 Relationship between cumulative afforestation area in Shanxi Province and high vegetation (FVC>60%) coverage area in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

主要分布有耕地,植被覆盖度居中;而在矿区和城镇植被覆盖度低。2000—2020年汾河流域植被覆盖度的增加主要受生态工程的影响,原因如下:①汾河流域高和极高植被覆盖区域的面积与山西省累积植树造林的面积呈显著的线性相关关系, R^2 为0.78(图8);②汾河流域植被覆盖度呈显著和极显著增加的区域与2000年之后林地和草地增加的区域基本一致(图5和图7);③张会霞等^[22]的研究表

明汾河流域的植被覆盖度随着高程和坡度的增加而增加;而“退耕还林还草政策”的主要途径是将坡度较大的耕地(西北地区坡度 $>15^\circ$,其他地区坡度 $>25^\circ$)改造为林地和草地,使得陡坡地的植被覆盖度增加;可见退耕还林还草工程对汾河流域植被覆盖度增加的重要贡献;④张衡等^[21]发现汾河流域的植被指数对气温和降水的响应较弱。汾河流域植被覆盖度的减小主要受城镇化的影响,汾河流域大面积新增建设区域的植被覆盖度显著减小(图5~6和图9),大部分区域由于增加的建设用地呈较小斑块状散落在其他用地类型中,对整体植被覆盖度的值影响不大。2000—2020年,汾河流域有77.1%的区域植被覆盖度呈增加趋势,有21.2%的区域变化不显著,有1.7%的区域呈下降趋势。

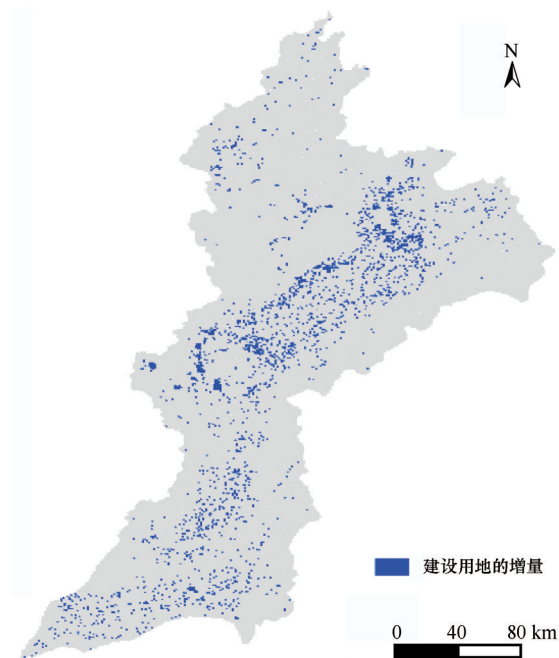


图9 2000—2020年汾河流域建设用地的变化

Fig.9 The variation of construction land in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

1997年的特大旱灾和1998年的特大洪灾,促使中国政府实施了两项前所未有的保护行动——天然林保护工程和退耕还林还草工程^[7]。天然林保护工程于1998年启动;退耕还林还草工程于1999年启动并率先在甘肃、陕西、四川三省开展,2000年在全国13省市、174个县展开试点,2002年全面展开^[31]。在山西省,国家于2000年首先批准黄河流域的河曲等10个县作为退耕还林还草试点示范县,经过两年的探索和积累,于2002年在山西全面铺开,汾河流域的退耕还林还草工程是从2002年开始的。

2000—2019年山西省共承担18 886 km²的退耕还林任务^[32],其中:2000—2010年,完成15 097 km²;至2013年完成第一轮退耕还林工程;2014年,第二轮退耕还林工程启动。黄土高原地区曾面临严重的水土流失,是这两项生态工程尤其是退耕还林还草工程实施的重点区域。自2000年开始,黄土高原地区的植被覆盖度显著提升、生态环境得到极大的改善^[30,33-37]。由图10可知,2000—2020年,黄土高原地区不同区域的植被覆盖变化趋势基本相似:2000—2013年,植被覆盖度或者植被指数(NDVI)的值均呈明显的上升趋势;而2013年之后植被覆盖度或者植被指数(NDVI)的值无明显增加趋势,且区域之间存在差异。这是因为2013年前后各省的第一轮退耕还林还草工程基本完成,该轮工程以大范围的陡坡耕地还林和荒山荒地造林为主,林地增幅大;后期可造林的空间相对有限。事实上黄土高原部分地区植被的增加是从2002年开始的,2001年之前植被呈减少趋势(图10),这是因为大规模的退耕还林还草政策是从2002年开始的;2000年仅有部分试点地区开展。例如由于山西省2000年实施的试点区域并不在汾河流域,故2000—2001年汾河流域的植被覆盖度并未增加,而是减小的;2002年之后才开始呈增加趋势。2000—2020年,汾河流域的平均植被覆盖度呈线性增加趋势,其中2000—2013年和2000—2020年的回归斜率分别为0.0131和0.0087(图2)。山西省2014年后的退耕还林还草工程多以提质增效、荒山造林和少数贫困地区的退耕还林为主,植被覆盖度不再呈明显增加趋势,而是在特定值附近波动。

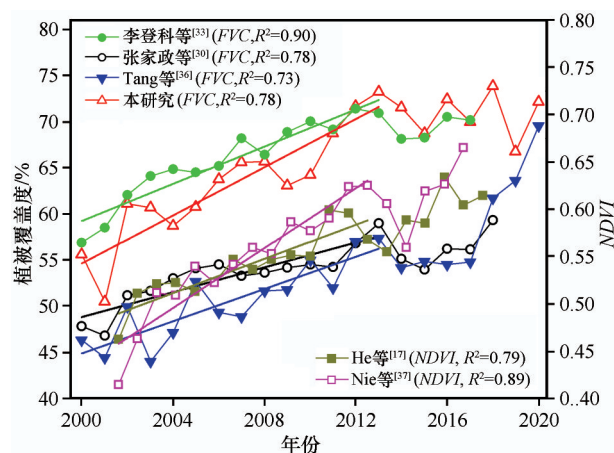


图10 黄土高原地区植被覆盖度的时间变化特征

Fig.10 The temporal variation of vegetation coverage in the Loess Plateau

4 结论

2000—2020年,汾河流域的植被覆盖度整体上呈波动增加的趋势,年增加速率为0.87%;主要表现为高和极高植被覆盖区域的面积呈明显增加趋势,而低和中等植被覆盖区域的面积呈降低趋势,极低植被覆盖区域的面积基本保持稳定。2020年极低、低、中等、高和极高植被覆盖区域面积占比分别为0.19%、2.30%、18.11%、46.74%和32.66%。

研究期间汾河流域的植被覆盖度存在明显的时空变异性,变异系数在0.01~2.02波动。原有山区国家级自然保护区及省级森林公园、盆地内的农田及城市覆盖区域,植被覆盖度的变异小,生态系统处于稳定状态;山区退耕还林还草区域、矿产资源开发及城市扩张区域,植被覆盖度的变异大。

汾河流域植被覆盖度增加的区域主要受生态工程的影响,而植被覆盖度减少的区域主要受城镇化的影响。2000—2020年,汾河流域有77.1%的区域植被覆盖度呈增加趋势,有21.2%的区域变化不显著,仅有1.7%的区域呈下降趋势。

参考文献:

- [1] 陈效速,王恒.1982—2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J].地理学报,2009,64(1):84-94.
- [2] Wu G L, Liu Y F, Cui Z, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: a meta-analysis[J].Journal of Applied Ecology, 2020, 57(5):875-885.
- [3] 尹振良,冯起,王凌阁,等.2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J].中国沙漠,2022,42(4):11-21.
- [4] 张耀文,张勃,姚荣鹏,等.2000—2020年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J].中国沙漠,2022,42(2):223-233.
- [5] 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.
- [6] Li J, Zhang J Y, Wang X J, et al. Long term observation of fractional vegetation cover in Qingyang of Gansu Province and its response to climate change[J].Atmosphere, 2022, 13(2):288.
- [7] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services[J].Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(28):9477-9482.
- [8] Song W Q, Feng Y H, Wang Z H. Ecological restoration programs dominate vegetation greening in China[J].Science of The Total Environment, 2022, 848:157729.
- [9] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological

- restoration in the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209/210: 87–99.
- [10] Jin F M, Yang W C, Fu J X, et al. Effects of vegetation and climate on the changes of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 773: 145514.
- [11] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420–427.
- [12] Li S, Liang W, Fu B J, et al. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 1032–1039.
- [13] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260–270.
- [14] Shi S Y, Yu J J, Wang F, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 755: 142419.
- [15] Liu Z J, Wang J Y, Wang X Y, et al. Understanding the impacts of "Grain for Green" land management practice on land greening dynamics over the Loess Plateau of China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105084.
- [16] Wu D, Zou C X, Cao W, et al. Ecosystem services changes between 2000 and 2015 in the Loess Plateau, China: a response to ecological restoration[J]. *PloS One*, 2019, 14(1): e0209483.
- [17] 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.
- [18] 侯志华, 马义娟, 葛虹. 基于RS的汾河流域植被覆盖变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(2): 162–166.
- [19] 韩丽君, 李晶. 近10年汾河流域植被覆盖时空变化研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(6): 824–831.
- [20] 白建伟. 汾河流域近17年植被覆盖度时空特征变化研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
- [21] 张衡, 马义娟, 李乐乐, 等. 汾河流域植被NDVI的时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 35(3): 322–332.
- [22] 张会霞, 李永梅, 张娜. 汾河流域植被覆盖度时空特征与地形因子的关系[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 353–359+368.
- [23] 李英明, 潘军峰. 山西河流[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [24] 刘耀宗, 张经元. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [25] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. [2022-09-24]. <http://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54>.
- [26] 张仁华. 试验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [27] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001–2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255–1268.
- [28] 苗正红, 刘志明, 王宗明, 等. 基于MODIS NDVI的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(3): 387–393.
- [29] 张成才, 姜洋, 李颖, 等. 基于像元二分模型的伏牛山地区植被覆盖度变化[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 301–307.
- [30] 张家政, 李崇贵, 王涛. 黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 224–230.
- [31] 徐晋涛, 曹铁瑛. 退耕还林还草的可持续发展问题[J]. *国际经济评论*, 2002(增刊2): 56–60.
- [32] 梁燕. 山西省退耕还林成效与经验探讨[J]. *山西林业*, 2020(3): 6–7.
- [33] 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.
- [34] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 949–960.
- [35] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1748–1758.
- [36] Tang Z X, Zhou Z X, Wang D, et al. Impact of vegetation restoration on ecosystem services in the Loess Plateau, a case study in the Jinghe Watershed, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109183.
- [37] Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 613.

Vegetation coverage change and its response to ecological protection project in Fenhe River Basin

Ma Xiaohong^{a,b}, Lin Fei^b, Yuan Liming^b, Niu Junjie^b

(a. Shanxi Collaborative Innovation Center for Coordinated Urban and Rural Development / b. Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Vegetation is an important component of terrestrial ecosystems, and it plays an important role in preventing desertification and conserving soil and water in arid and semi-arid regions. Fractional vegetation coverage (*FVC*), in turn, is an important indicator of vegetation and ecological environment status. To understand the ecological status from 2000 to 2020 in Fenhe River Basin, this study examined the spatial distribution and temporal variations of vegetation coverage, investigated the vegetation response to ecological protection project. Our results demonstrate that: (1) The *FVC* increase from 55% in 2000 to 72% in 2020, with an increase rate of 0.87% per year, which is manifested with the increase of the high *FVC* area ($FVC > 60\%$). The ecological environment quality of the region has been significantly improved. (2) Under the influence of ecological protection project, *FVC* increase in 77.1% of the area, and decrease in 1.7% of the area under the urbanization and mineral resources development. (3) The spatial and temporal variability of *FVC* are great, and the coefficient variation fluctuates between 0.01 and 2.20. The *FVC* is stable in original alpine forest area, valley agricultural area and urban construction. This study would provide a theoretical basis for formulating policies related to ecological environmental protection and sustainable development.

Key words: Fenhe River Basin; fractional vegetation coverage; ecological protection project