

1982—2021 年黄河流域植被覆盖时空演变及影响因素研究

李雪银^{1,2}, 张志强^{2,3*}, 孙爱芝¹

1. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

2. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 郑州 450045

3. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室(河南大学), 开封 475001

摘要: 通过科学认识黄河植被覆盖的空间格局、时间规律, 揭示气候变化与人类活动对植被覆盖率空间演化的影响与机理, 对于提出科学的生态防护方法、进行生态安全评价, 以及推进黄河战略有着重大的理论意义与应用意义。本文以 1982—2015 年 GIMMS NDVI 和 2000—2021 年 MODIS NDVI 为主要数据源, 通过最大值合成法、平均值法、Theil-Sen Median 和 Mann-Kendall 等方法分析了黄河流域 1982—2021 年植被覆盖空间格局、月际和年际变化规律。结合同时段年平均气温和年降水量, 采用二元线性回归分析和残差分析等方法, 探讨了黄河流域植被覆盖的主要影响因素。根据时空变化分析, 1982—2021 年黄河流域多年 NDVI 均值变化趋势由西北向东南依次增加, 年际变化呈现波动增长趋势, 增长速率为 $0.019 \cdot (10a)^{-1}$, 月际变化呈现先增后减的单峰曲线状分布, 8 月 (0.50) 为峰值。根据变化趋势分析, 1982—2021 年黄河流域 77.35% 的区域植被覆盖呈增加趋势。根据影响因素分析, 黄河流域植被覆盖以气候变化和人类活动共同作用为主要影响因素, 其中受人类活动促进作用较为明显, 约占 46.13%。因此, 气候变化和人类活动共同作用是黄河流域植被覆盖变化的影响因素, 其中人类活动对植被恢复有重要作用。

关键词: 黄河流域; GIMMS NDVI; MODIS NDVI; 植被覆盖; 多元线性回归模型; 残差分析

Study on the spatial-temporal evolution and influence factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin during 1982—2021

LI Xueyin^{1,2}, ZHANG Zhiqiang^{2,3*}, SUN Aizhi¹

收稿日期: 2021-12-26; 录用日期: 2022-03-11; 网络出版: 2022-03-25

Received Date: 2021-12-26; Accepted Date: 2022-03-11; Online first: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972189); 中央高校基本科研业务费专项资金; 河南省高等学校重点科研项目 (22A170012); 河南省科技攻关项目 (222102320236); 黄河中下游地理空间技术教育部重点实验室 (河南大学) 开放基金 (GTJR202106)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41972189); The Fundamental Research Funds for the Central Universities; Key Scientific Research Project of Henan Colleges and Universities (22A170012); Key Science and Technology Research Project of Henan Province (222102320236); Open Fund of Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education (GTJR202106)

通信作者: 张志强, E-mail: zhangzhiqiang@ncwu.edu.cn

Corresponding Author: ZHANG Zhiqiang, E-mail: zhangzhiqiang@ncwu.edu.cn

引用格式: 李雪银, 张志强, 孙爱芝. 2022. 1982—2021 年黄河流域植被覆盖时空演变及影响因素研究 [J]. 地球环境学报, 13(4): 428—436.

Citation: Li X Y, Zhang Z Q, Sun A Z. 2022. Study on the spatial-temporal evolution and influence factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin during 1982—2021 [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(4): 428—436.

1. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
2. College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China
3. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education, Kaifeng 475001, China

Abstract: Background, aim, and scope Depicting the spatial-temporal dynamics of vegetation coverage in the Yellow River Basin and delineating the influences of climate change and human activities on the dynamics has are of significant importance for understanding the surface earth systems in general and also for formulating ecological protection plans of the Yellow River Basin in particular. This study uses GIMMS NDVI data from 1982—2015 and the MODIS NDVI data from 2000—2021 to explore the spatial and temporal characteristics of vegetation covers in the Yellow River Basin for the period from 1982 to 2021 with an attempt to reveal the influencing factors. **Materials and methods** Based on GIMMS NDVI and MODIS NDVI, this paper employs several methods including maximum value composite, mean, Theil-Sen Median trend analysis and Mann-Kendall test to analyze the spatial distribution and inter-annual and inter-month changes of the vegetation covers in the Yellow River Basin. The influencing factors were explored through examining the correlations of the spatial and temporal characteristics of the remotely-sensed vegetation covers with the climate factors (i.e., temperature and precipitation) and human activities (e.g., land-use types and ecological protection methods) using binary linear regression analysis and residual analysis and other methods. **Results** Our analytical results show that the multi-year average NDVI values increased from the northwest to the southeast and that the annual mean values of the vegetation covers fluctuate relatively greatly along an increasing trend with a growth rate of $0.019 \cdot (10a)^{-1}$. Understandably, the monthly mean values showed a single-peak distribution pattern with August being the peak time. Overall, 77.35% of the studied areas were characterized by exhibiting an increasing trend of vegetation cover during the study period (i.e., 1982—2021). Our analytical results also show that the vegetation coverage of the Yellow River Basin is affected by the combined effects of climate change and human activities with human activities being more significant in the observed amelioration of vegetation cover. **Discussion** Compared with previous studies, our analytical results show that the spatial-temporal distribution of vegetation coverage in the Yellow River Basin is significantly different, and the overall vegetation coverage in the Yellow River Basin show an increasing trend. Due to the joint effect of climate change and human activities, the vegetation coverage of the Yellow River Basin increases from northwest to southeast, and human activities mainly promoted the growth of vegetation coverage. However, there are still some areas with a downward trend of vegetation cover (e.g., some areas in the upper reaches of the Yellow River), which need to be strengthened management and protection by relevant departments. **Conclusions** In brief, several conclusions can be drawn from this study. First, the overall vegetation coverage showed an increasing trend during the study period. Second, the vegetation coverage increased from the northwest to the southeast. Third, the observed changes in the vegetation coverage were influenced by both climate and human factors with human factors being more significant. **Recommendations and perspectives** It should be particularly pointed out that the vegetation in some areas of the Yellow River Basin experienced deterioration under the background of overall amelioration in the entire basin and the areas need management attention.

Key words: Yellow River Basin; GIMMS NDVI; MODIS NDVI; vegetation coverage; multiple linear regression model; residual analysis

植被具有明显的季节和年际变化, 在调节气候系统和陆地生态系统中发挥着重要作用, 可作为生态环境质量和变化的主要指标之一 (Wu et al, 2015), 是评估生态环境质量和植被覆盖

动态变化的重要参数, 而气候变化 (降水和气温) 是影响植被生长的关键因素 (Roerink et al, 2003; Zeng et al, 2014)。随着社会经济的迅速发展, 人类活动对植被覆盖产生了促进或抑制的影

响(孙建国等, 2014)。受气候变化和人类活动双重影响, 近年来黄河流域植被覆盖发生了明显改善, 但生态系统仍然脆弱(Cao et al, 2014)。因此, 开展黄河流域植被覆盖时空演变及其影响因素研究, 对制定科学合理的生态保护方案、开展生态安全评价, 推动黄河战略均具有重要的理论意义和应用价值(张志强等, 2021)。

遥感具有大尺度、低成本、重复观测等优势, 已广泛应用于黄河流域植被覆盖时空演变和影响因素研究(信忠保等, 2007; Liu et al, 2014; Liu et al, 2016)。李双双等(2012)基于 MODIS NDVI 研究发现陕甘宁地区植被覆盖以轻微改善为主, 且主要是受人类活动和气候变化共同影响, 其中人类活动影响明显。赵周安等(2017)基于 1982—2015 年 GIMMS NDVI3g 研究发现黄土高原 NDVI 整体呈现增加趋势, 但有部分地区未来可能有退化趋势; 降水对 NDVI 增长的具有较强的影响, 且生态工程对黄土高原植被恢复有重要作用。Shi et al (2021) 基于 2000—2016 年 MODIS NDVI 和 SPEI 研究发现黄土高原 NDVI 整体以 $0.086 \cdot (10a)^{-1}$ 增长; NDVI 与 SPEI 的相关性主要为正相关, 气候变化(人类活动)对 NDVI 变化的贡献率为 45.78% (54.22%); NDVI 的长期趋势对气候变化的敏感性高于短期趋势。

综上所述, 国内外学者利用不同类型遥感数据开展了黄河流域植被覆盖变化研究。从空间角度, 已有研究侧重于黄河流域上游和中游植被覆盖变化分析(Cao et al, 2014; 陆荫等, 2020; 吴加敏等, 2020), 关于下游甚至黄河流域整体的研究相对较少, 而下游地区人口密集, 易发生洪水灾害, 其生态环境对开封、封丘、聊城等华北部分地区的生态系统良性维持具有重要作用。从时序角度, 已有的 8 km 分辨率的植被覆盖变化研究时间跨度通常为 1982—2015 年, 缺少 2015 年以后植被覆盖变化特征的研究分析。鉴于此, 本文拟融合 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 研究黄河流域 1982—2021 年植被覆盖时空变化特征及影响因素。首先建立线性回归模型, 利用 MODIS NDVI 数据对 GIMMS NDVI 数据时间序列进行插补延长处理, 然后运用 Theil-Sen Median 和 Mann-Kendall 等方法分析黄河流域 1982—2021 年植被覆盖空间格局、月际和年际变化规律, 最后结合同时段气象资料采用多元线性回归和残差分析探

讨植被覆盖变化对气候变化和人类活动的响应, 以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供切实有效的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域地处东经 $95^{\circ}53'$ — $119^{\circ}12'$, 北纬 $32^{\circ}09'$ — $41^{\circ}50'$, 流域面积约 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ (含内流区), 涉及 9 个省/区, 地形西高东低, 地势高差悬殊。受到季风环流和山地大气环流的影响, 不同地区的气温、降水、光照等气候因素差异显著, 形成较为复杂的生态环境, 这为多种多样的植被类型提供了良好的生长条件; 中下游地区为人口密集区, 形成“东重西轻”的经济发展格局(覃成林, 2011)。受降水、气温、地形地貌等多种自然因素和人为因素综合作用, 黄河流域生态资源被过度开发, 黄河流域生态环境脆弱(兰恒星等, 2021; 张志强等, 2021)。

1.2 数据来源

遥感数据为 GIMMS NDVI 和 MDOIS NDVI 数据, GIMMS NDVI 为 1982 年 1 月—2015 年 12 月 GIMMS NDVI3g (<https://data.tpdc.ac.cn/en/data/9775f2b4-7370-4e5e-a537-3482c9a83d88/>), 时间分辨率为 15 d, 空间分辨率为 8 km。MODIS NDVI 为 2000 年 2 月—2021 年 12 月 MOD13A3 月尺度数据 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>), 空间分辨率为 1 km。为了进一步减少大气中的云、气溶胶、太阳高度角等因素的影响, 采用最大值合成法(MVC)对 NDVI 数据处理获得月 NDVI 数据(金凯等, 2020), 并定义 4—10 月为生长季, 取生长季内月平均值为年 NDVI 数据。

气象数据为 1982—2021 年黄河流域 94 个气象站点的日气温和日降水数据 (<https://data.cma.cn/>), 预处理气象数据并计算各站点逐年的生长季平均气温和累计降水量; 空间插值获得逐年的且与 NDVI 数据空间分辨率一致、投影相同的气温和降水栅格数据。

1.3 方法

1.3.1 数据融合

由于 GIMMS 和 MODIS 数据是不同传感器的数据产品, 其空间分辨率和地理坐标存在一定差异, 因此, 需要先将 MODIS NDVI 数据进行重采样、投影转换和裁剪等处理, 以获得与

GIMMS NDVI 数据地理坐标相同、空间分辨率一致的 MODIS NDVI 数据; 其次, 根据重合年份 (2000—2015 年) 构建线性回归模型, 基于 MODIS NDVI 数据获得 2016—2021 年 GIMMS NDVI 插补值。计算公式如下:

$$NDVI_{G_i} = k \times NDVI_{M_i} + b \quad (1)$$

式中: $k = [\sum_{i=1}^n (NDVI_{M_i} - \overline{NDVI_M}) \times (NDVI_{G_i} - \overline{NDVI_G})] \div \sum_{i=1}^n (NDVI_{M_i} - \overline{NDVI_M})^2$, $b = \overline{NDVI_G} - k \times \overline{NDVI_M}$; $1 \leq i \leq n$, n 为重合年份数目; $NDVI_{G_i}$ 和 $NDVI_{M_i}$ 分别为 GIMMS 和 MODIS NDVI 年时序数据集。图 1 为 2000—2015 年 GIMMS NDVI 原始值与其插补值 (GIMMS NDVI*) 线性关系。

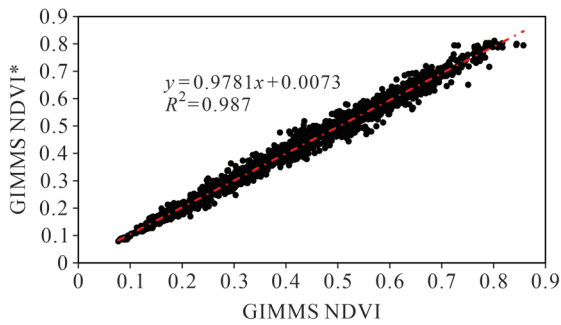
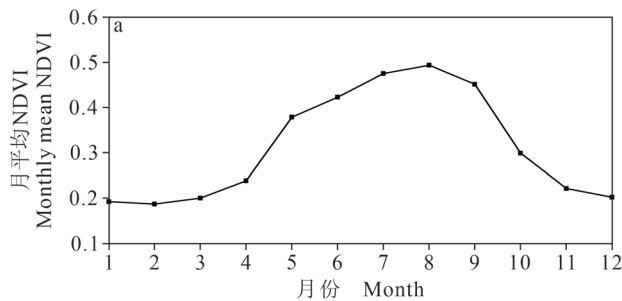


图 1 2000—2015 年 GIMMS NDVI 原始值与其插补值 (GIMMS NDVI*) 线性关系

Fig. 1 Linear relationship between the original GIMMS NDVI and its interpolated value (GIMMS NDVI*) during 2000—2015

1.3.2 Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析为非参数趋势度方法, 是对时序数据变化趋势的定量描述 (Sen, 1968; Theil, 1992)。计算公式如下:



$$\beta = \text{Median}[(NDVI_{H_j} - NDVI_{H_i}) \div (j - i)], \forall j > i \quad (2)$$

式中: $1 \leq i < j \leq n$, n 为总时序长度, $NDVI_{H_i}$ 和 $NDVI_{H_j}$ 为 NDVI 年时序数据集。当 $\beta > 0$ 时, NDVI 呈现上升趋势。反之, 呈现下降趋势, β 数值越小, 下降趋势越明显。本研究采用 Mann-Kendall 检验判断变化趋势的显著性 (Mann, 1945; Kendall, 1957), 选取的置信水平为 95% 和 99%。

1.3.3 残差分析

本研究假设 1982—2000 年植被覆盖变化仅受气候变化的影响, 以年 NDVI 为因变量, 3—10 月平均气温和累计降水量为自变量, 构建多元线性回归模型并进行残差分析。计算公式如下:

$$NDVI_{cli} = a \times T + b \times P + c \quad (3)$$

$$NDVI_{peo} = NDVI_{obs} - NDVI_{cli} \quad (4)$$

式中: a 、 b 和 c 为多元线性回归模型参数; T 和 P 分别为平均气温和累计降水量; $NDVI_{obs}$ 为 NDVI 的观测值; $NDVI_{cli}$ 和 $NDVI_{peo}$ 分别为仅受气候变化和仅受人类活动影响的 NDVI。当 $NDVI_{peo} > 0$ 时, 人类活动具有正向影响, 促进植被生长; 反之表示人类活动抑制植物生长, 使得植被加剧退化 (Evans and Geerken, 2004)。

2 数据结果与分析

2.1 黄河流域植被覆盖时空分布格局

在时序格局上, 1982—2021 年黄河流域植被覆盖月均 NDVI 值先上升后下降, 呈单峰曲线状分布 (图 2a), 以 8 月 (0.50) 为中心向两侧递减; 近 40 a 植被覆盖年际变化呈现波动增长趋势 (图 2b), 增长速度为 $0.019 \cdot (10a)^{-1}$, 年均 NDVI 值介于 0.36—0.45, 其中 2018 年 (0.45) 最高。

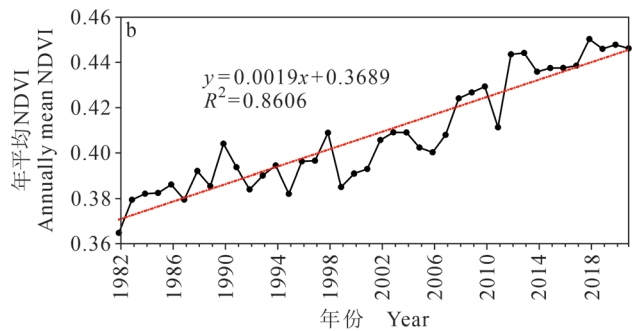


图 2 1982—2021 年黄河流域植被覆盖月际 (a) 和年际变化 (b)

Fig. 2 Monthly (a) and annual (b) change of vegetation coverage in the Yellow River Basin during 1982—2021

在空间格局上,近 40 a 黄河流域植被覆盖空间分布整体呈东部、西部和南部地区高,北部地区较低的特征(图 3)。将黄河流域多年 NDVI 均值等间距重分类为 5 级:低植被覆盖区(0.0—0.2)主要分布在流域西北边缘地带,其面积为 $1.05 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占 13.44%; 较低植被覆盖区(0.2—0.4)主要分布于甘肃省东部和陕西省北部,其面积为 $2.80 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占 35.85%; 一般植被覆盖区(0.4—0.6)主要在青海省东南部、甘肃省南部和中游南部等地区,其面积为 $2.77 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占 35.47%; 较高植被覆盖区(0.6—0.8)主要分布在青海南部和中下游,其面积约有 $1.16 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占 14.85%; 高植被覆盖区(0.8—1.0)呈斑块状分布,其面积为 $0.03 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占 0.39%。

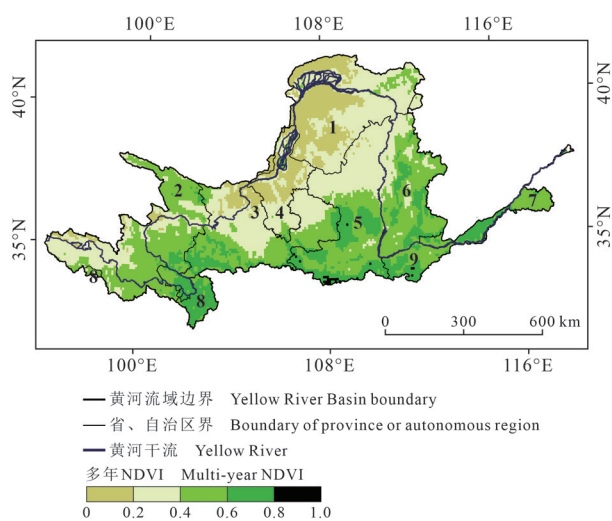


图 3 1982—2021 年黄河流域多年 NDVI 均值分布
 Fig. 3 The distribution of the mean value of NDVI in the Yellow River Basin during 1982—2021

2.2 黄河流域植被覆盖空间变化

根据设定的置信水平(99%和95%)对应的|Z|值(2.58和1.96),将植被覆盖变化趋势显著性分级(图4和表1),结果显示:近40a流域中部和东部区域植被覆盖整体呈上升趋势,约占总面积的77.35%,其中呈显著上升趋势的约占总面积的62.33%,这可能与退耕还林(草)和生态治

理政策实施等工程积极影响有关。植被覆盖变化不明显的主要分布在青海省和西部边缘地带,约占14.40%,主要分布在植被覆盖较差(如沙漠区中心地带、裸岩山区)或植被覆盖良好的地区。在黄河源区、银川市、吴忠市、西安市和渭南市等地区植被覆盖呈退化趋势,约占8.25%,其中呈显著退化区域主要集中在人口密集的城市集中发展地区(如关中平原城市群),这可能与城市大量扩张等人类活动有关,导致植被用地转变为建设用地。

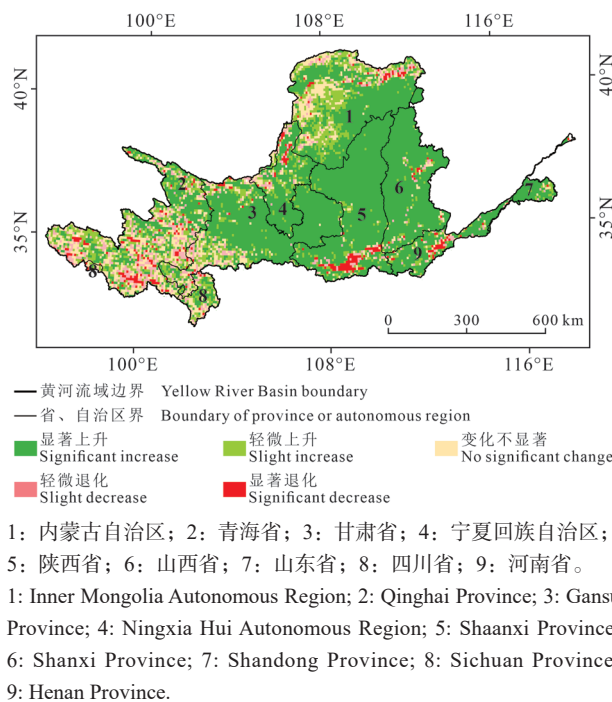


图 4 1982—2021 年黄河流域植被覆盖变化趋势

Fig. 4 Vegetation cover change trends in the Yellow River Basin during 1982—2021

2.3 黄河流域植被覆盖变化的影响因素

为了区分气候变化和人类活动对植被的影响,本文参考 Sun et al (2015) 提出的气候变化和人类活动对植被变化影响的方法,进行植被覆盖变化影响因素划分(表2)。结果表明黄河流域植被覆盖对气候变化和人类活动的响应存在较大的空间差异(图5)。在图5a中,气候变化对植被覆盖增加基本无影响的面积约有27.41%,主要分布于甘肃省、宁夏回族自治区和陕西省部分地区;有促进作用的面积约有42.40%,主要集中在青海省东部、河南省、山西省和祁连山脉等部分地区;有抑制作用的面积约有30.19%,主要在黄河源区、鄂尔多斯高原、毛乌素沙地和山西省中部

等区域, 其中有明显抑制和中度抑制的面积约有 6.84%, 主要分布在山西省中部地区和内蒙古自治区部分区域。而在图 5b 中, 人类活动对黄河流域的植被覆盖增加基本无影响的面积约有 13.09%, 主要分布在黄河流域上游部分地区; 有促进作用的面积约有 73.69%, 其中有明显促进和中度促进的约有 52.50%, 主要集中在黄河流域中部地区; 有

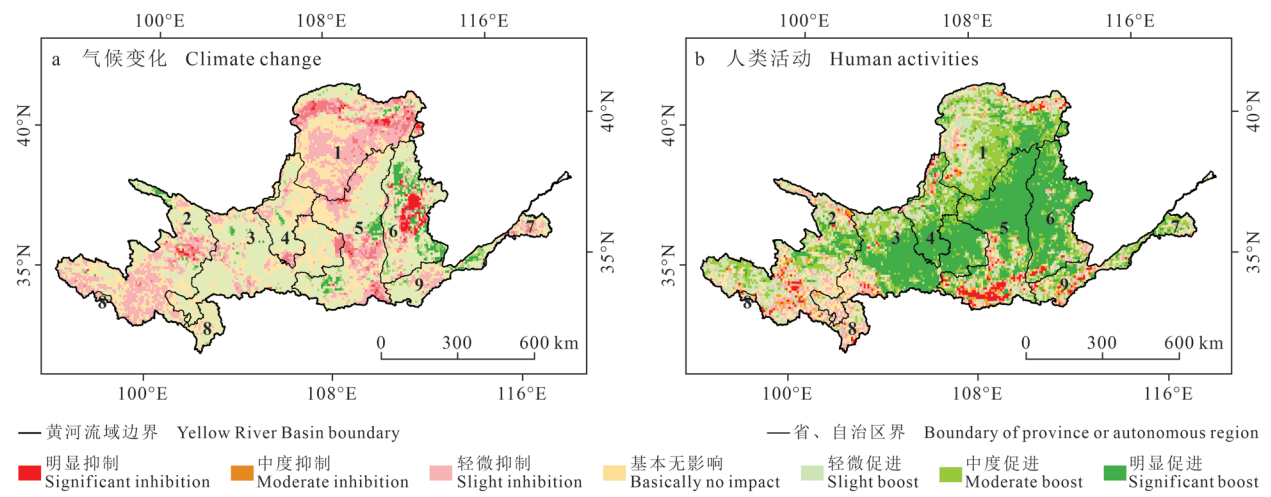
抑制作用的约有 13.22%, 主要分布于黄河源区、宁夏平原地区、陕西省南部和河南省部分地区, 其中明显抑制和中度抑制约占 10.06%。研究时段内, 气候变化和人类活动对黄河流域植被覆盖变化影响的平均值分别为 $-0.12 \times 10^{-3} \cdot a^{-1}$ 和 $2.83 \times 10^{-3} \cdot a^{-1}$, 表明人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响主要表现为促进作用。

表1 黄河流域植被覆盖变化趋势面积统计
Tab. 1 Statistics on the trend area of vegetation coverage in the Yellow River Basin

变化趋势 Changing trends	Sen 趋势度 (β) Sen trend degree (β)	趋势检验 ($ Z $) Trend testing ($ Z $)	面积占比 Percentage of area/%
显著上升 Significant increase	>0	$ Z \geq 2.58$	62.33
轻微上升 Slight increase	>0	$1.96 \leq Z < 2.58$	15.02
变化不明显 No significant change	>0 或 <0	$ Z < 1.96$	14.40
轻微退化 Slight decrease	<0	$1.96 \leq Z < 2.58$	5.74
显著退化 Significant decrease	<0	$ Z \geq 2.58$	2.51

表2 植被覆盖变化的影响因素划分 (Sun et al, 2015)
Tab. 2 Methods for assessing influence factors of vegetation cover changes (Sun et al, 2015)

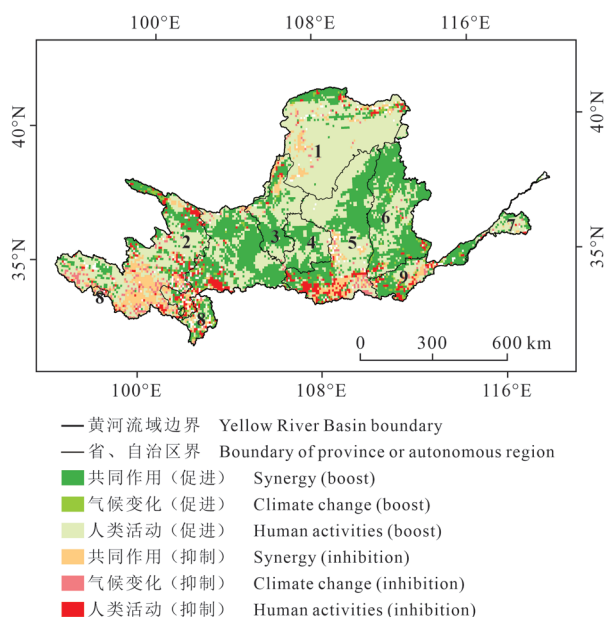
Slope(NDVI _{obs})	影响因素划分标准 Impact factor classification standard		影响因素 Impact factor
	Slope(NDVI _{cli})	Slope(NDVI _{peo})	
>0	>0	>0	共同作用(促进) Synergy (boost)
	>0	<0	气候变化(促进) Climate change (boost)
	<0	>0	人类活动(促进) Human activities (boost)
<0	<0	<0	共同作用(抑制) Synergy (inhibition)
	<0	>0	气候变化(抑制) Climate change (inhibition)
	>0	<0	人类活动(抑制) Human activities (inhibition)



1: 内蒙古自治区; 2: 青海省; 3: 甘肃省; 4: 宁夏回族自治区; 5: 陕西省; 6: 山西省; 7: 山东省; 8: 四川省; 9: 河南省。
1: Inner Mongolia Autonomous Region; 2: Qinghai Province; 3: Gansu Province; 4: Ningxia Hui Autonomous Region; 5: Shaanxi Province; 6: Shanxi Province; 7: Shandong Province; 8: Sichuan Province; 9: Henan Province.

图5 2001—2021年气候变化与人类活动分别对黄河流域植被恢复的影响空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of climate and human activities impacts on vegetation restoration in the Yellow River Basin during 2001—2021

图 6 为气候变化和人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响。结果表明由气候变化和人类活动共同作用且对植被增长有促进作用的面积约占 36.65%，主要分布在甘肃省东部、陕西省北部、山西省和下游等地区；仅受气候变化（人类活动）影响对植被增长有促进作用的面积约有 2.19%（46.13%）。而由气候变化和人类活动共同作用且对植被增长有抑制作用的面积约有 7.32%，主要在黄河源区；仅受气候变化（人类活动）影响且对植被增长有抑制作用的面积占比为 2.53%（5.18%），主要分布在流域南部边缘地带。



1: 内蒙古自治区; 2: 青海省; 3: 甘肃省; 4: 宁夏回族自治区; 5: 陕西省; 6: 山西省; 7: 山东省; 8: 四川省; 9: 河南省。
1: Inner Mongolia Autonomous Region; 2: Qinghai Province; 3: Gansu Province; 4: Ningxia Hui Autonomous Region; 5: Shaanxi Province; 6: Shanxi Province; 7: Shandong Province; 8: Sichuan Province; 9: Henan Province.

图 6 2001—2021 年黄河流域植被覆盖变化影响因素空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the impact factors of vegetation cover changes in the Yellow River Basin during 2001—2021

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文通过研究发现黄河流域植被覆盖时空分布差异较为明显，整体呈波动上升趋势，植被分布特征为西北低东南高，这与前人研究一致（高江波等，2019；金凯等，2020）。黄河流域植被覆盖整体为上升趋势，受气候变化和人类活动综

合作用，而降水和气温等气候因子具有空间异质性（高江波等，2019），气候变化对黄河流域不同地区植被覆盖变化的影响程度不同。

本文通过构建线性回归模型，实现了 MODIS NDVI 数据插补延长 GIMMS NDVI 数据，以便分析黄河流域植被覆盖的时空演变和影响因素。研究发现：气候变化和人类活动共同作用对植被覆盖的增长有促进作用的区域主要在中游和下游，人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响主要表现为促进作用，约占总流域的 46.13%。主要由于自 2000 年实施了植树造林、退耕还林（草）等一系列的生态建设工程，黄土高原、鄂尔多斯等地的植被覆盖在人类的保护和治理下逐步改善（信忠保等，2007；李晓光等，2014；孙建国等，2014；赵安周等，2017）。

3.2 结论

本文基于 GIMMS NDVI 数据、MODIS NDVI 数据和气象数据（降水和气温），分析近 40 a 黄河流域植被覆盖时空格局及其影响因素。主要结论如下：

（1）在时空分布上，近 40 a 黄河流域植被覆盖由西北向东南递增，流域西北部地区植被覆盖相对较少。月际变化以 8 月为最大值（0.50），主要是 8 月温度相对较高，降水相对较多；年际变化整体呈波动增长趋势，增长速率为 $0.019 \cdot (10a)^{-1}$ 。

（2）在 1982—2021 年，黄河流域大部分地区植被覆盖变化呈上升趋势，约有 77.35%，但是仍有部分地区的植被覆盖呈退化趋势，约有 8.25%，其中呈显著减少趋势的区域集中在城市集中发展地区。

（3）黄河流域植被覆盖变化主要受到气候变化和人类活动共同作用，其中受人类活动促进作用影响的区域有 46.13%，受气候变化促进作用影响的区域有 2.19%，表明人类活动对黄河流域植被覆盖变化的促进作用影响较显著。

参考文献

- 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 2019. 1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析 [J]. *地理学报*, 74(3): 534—543. [Gao J B, Jiao K W, Wu S H. 2019. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982—2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 74(3): 534—543.]

- 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 2020. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. *地理学报*, 75(5): 961–974. [Jin K, Wang F, Han J Q, et al. 2020. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 75(5): 961–974.]
- 兰恒星, 祝艳波, 李郎平, 等. 2021. 黄河流域地质—地貌—气候多过程相互作用及其孕灾机制研究[J]. *中国科学基金*, 35(4): 510–519. [Lan H X, Zhu Y B, Li L P, et al. 2021. Research on multi process interaction of geology, geomorphology and climate in the Yellow River Basin and its gestation mechanisms on major disasters [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 35(4): 510–519.]
- 李双双, 延军平, 万佳. 2012. 近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 67(7): 960–970. [Li S S, Yan J P, Wan J. 2012. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(7): 960–970.]
- 李晓光, 刘华民, 王立新, 等. 2014. 鄂尔多斯高原植被覆盖变化及其与气候和人类活动的关系[J]. *中国农业气象*, 35(4): 470–476. [Li X G, Liu H M, Wang L X, et al. 2014. Vegetation cover change and its relationship between climate and human activities in Ordos Plateau [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 35(4): 470–476.]
- 陆荫, 张强, 李晓红, 等. 2020. 黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应[J]. *水土保持通报*, 40(2): 232–238. [Lu Y, Zhang Q, Li X H, et al. 2020. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its response to climate factors in Gansu section of Yellow River Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 40(2): 232–238.]
- 孙建国, 张卓, 韩惠, 等. 2014. 气候和人类因素在黄土高原西北部植被变化中的贡献率研究[J]. *遥感信息*, 29(2): 83–88. [Sun J G, Zhang Z, Han H, et al. 2014. Contributions of climate and human to vegetation variation on northwest Loess Plateau [J]. *Remote Sensing Information*, 29(2): 83–88.]
- 覃成林. 2011. 黄河流域经济空间分异与开发[M]. 北京: 科学出版社. [Qin C L. 2011. Spatial differentiation and development of economy in the Yellow River Basin [M]. Beijing: Science Press.]
- 吴加敏, 蔡创创, 孙灏, 等. 2020. 宁夏沿黄城市带植被覆盖时空演变及其驱动力分析[J]. *干旱区研究*, 37(3): 696–705. [Wu J M, Cai C C, Sun H, et al. 2020. Spatiotemporal evolution and driving force analysis of fractional vegetation coverage over the urban belt along the Yellow River in Ningxia [J]. *Arid Zone Research*, 37(3): 696–705.]
- 信忠保, 许炯心, 郑伟. 2007. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 37(11): 1504–1514. [Xin Z B, Xu J X, Zheng W. 2007. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981—2006): impacts of climate changes and human activities [J]. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 37(11): 1504–1514.]
- 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2021. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. *资源科学*, 43(4): 849–858. [Zhang Z Q, Liu H, Zuo Q T, et al. 2021. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000—2019 [J]. *Resources Science*, 43(4): 849–858.]
- 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 2017. 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*, 32(3): 449–460. [Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, et al. 2017. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 32(3): 449–460.]
- Cao R, Jiang W G, Yuan L H, et al. 2014. Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(6): 963–979.
- Evans J, Geerken R. 2004. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. *Journal of Arid Environments*, 57(4): 535–554.
- Kendall M G. 1957. Rank correlation methods [J]. *Biometrika*, 44(1/2): 298.
- Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, et al. 2014. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during

- 2000—2011 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2): 288–302.
- Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. 2016. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 26(1): 45–58.
- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 13(3): 245–259.
- Roerink G J, Menenti M, Soepboer W, et al. 2003. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(1/2/3): 103–109.
- Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379–1389.
- Shi S Y, Yu J J, Wang F, et al. 2021. 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*, 755: 142419. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142419.
- Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. 2015. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209/210: 87–99.
- Theil H. 1992. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis [M]// Raj B, Koerts J. Henri Theil's contributions to economics and econometrics. Berlin: Springer.
- Wu D H, Zhao X, Liang S L, et al. 2015. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. *Global Change Biology*, 21(9): 3520–3531.
- Zeng Z Z, Chen A P, Piao S L, et al. 2014. Environmental determinants of tropical forest and savanna distribution: a quantitative model evaluation and its implication [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(7): 1432–1445.