

2000—2020年延安市植被覆盖 时空变化及其影响因素

周璐红^{1,2}, 张康^{1,2}

(1.长安大学土地工程学院, 陕西西安710054; 2.陕西省土地整治重点实验室, 陕西西安710054)

摘要: [目的] 对陕西省延安市植被覆盖时空变化特征及其与气候变化和人类活动之间的关系进行研究, 为该市评估生态环境效益和生态环境建设提供科学支持。[方法] 基于MODIS-NDVI和气象等相关数据, 采用线性趋势分析、相关性分析和残差分析对延安市2000—2020年植被覆盖时空变化特征及其影响因素进行研究, 并用地理探测器分析不同因子对植被覆盖变化的影响以及各因子之间的交互作用。[结果] ①2000—2020年延安市植被NDVI总体呈上升趋势, 增速为10%/10 a, 快于同期三北防护林植被覆盖的平均增速。②延安市植被覆盖状况不断优化, 呈现改善的面积占99.64%, 其中明显改善的面积占97.85%, 呈现退化趋势的范围比例极少。③受水热分布的影响, 延安市呈现“东高西低, 南高北低”的植被分布格局。④延安市植被NDVI与降水的相关性要显著强于气温, 与气温的相关系数分布在-0.60~0.70, 其中呈正相关的面积占47.52%; 与降水的相关系数分布在-0.23~0.91, 其中呈正相关的面积占99.62%; ⑤延安市退耕还林还草等生态恢复工程的有效实施对植被状况改善最为显著, 降水作用次之, 气温和自然地理因素作用较小, 多影响因子对延安市植被覆盖变化的交互作用表现为非线性增强或双因子增强。[结论] 延安市是黄土高原腹地中心城市, 植被覆盖受气候和人类活动影响较大, 未来在生态建设背景下, 要立足于不同区域的资源禀赋, 人为因素合理参与, 因地制宜地采取相应的管控和补偿措施, 以期达到植被NDVI持续改善的效果, 进一步增强其生态效益。

关键词: NDVI; 植被覆盖; 时空变化; 影响因素; 延安市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0356-10

中图分类号: Q948.2

文献参数: 周璐红, 张康. 2000—2020年延安市植被覆盖时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 356-365. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.041; Zhou Luhong, Zhang Kang. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its influencing factors in Yan'an City from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 356-365.

Spatio-temporal Variation of Vegetation Cover and Its Influencing Factors in Yan'an City from 2000 to 2020

Zhou Luhong^{1,2}, Zhang Kang^{1,2}

(1.College of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2.Key Laboratory of Land Consolidation of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal variation characteristics of vegetation cover in Yan'an City and its relationship with climate change and human activities were studied in order to provide scientific support for the evaluation of eco-environmental benefits and eco-environmental construction in this area. [Methods] Linear trend analysis, correlation analysis, and residual analysis of MODIS-NDVI and meteorological data were used to determine the spatio-temporal characteristics and influencing factors of vegetation cover change in Yan'an City from 2000 to 2020. The effects of different factors on vegetation cover change and the interaction among them were analyzed by geographic detector. [Results] ① During the past 21 years, NDVI in Yan'an City showed an overall upward trend with a growth rate of 10%/10 yr, which was faster than the

收稿日期: 2022-11-28

修回日期: 2022-12-23

资助项目: 陕西省土地整治重点实验室开放基金项目“陕北黄土高原土地利用安全评价研究”(2019-JC02); 长安大学研究生教育教学改革资助项目(300103120050)

第一作者: 周璐红(1975—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 副教授, 主要从事土地资源管理及评价研究。Email: zylhzhou@chd.edu.cn.

average growth rate of vegetation coverage in the Three-North Shelterbelt System. ② The vegetation cover in Yan'an City had been optimized, with 99.64% of the area showing improvement, of which 97.85% was significantly improved, and the proportion of the area showing degradation was very small. ③ Influenced by the distribution of water and heat, Yan'an City exhibited a vegetation distribution pattern of "high in the east and low in the west, high in the south and low in the north". ④ The correlation coefficient between NDVI and precipitation was significantly larger than the correlation coefficient between NDVI and temperature in this area. The correlation coefficient between NDVI and temperature ranged from -0.60 to 0.70 , and the positive correlation area accounted for 47.52% of the total area. The correlation coefficient between NDVI and precipitation ranged from -0.23 to 0.91 , and the positive correlation area accounted for 99.62% of the total area. ⑤ The effective implementation of the policy of returning farmland to forest and grass in Yan'an City was the most significant factor in improving vegetation cover, followed by the role of precipitation. The roles of temperature and physical geography were smaller. [Conclusion] Yan'an City is a central city in the hinterland of the Loess Plateau. Vegetation cover there was influenced by climate and human activities. Ecological construction in the future will require knowledge based on the resource availability of different regions, with reasonable participation of human factors, and the use of corresponding control and compensation measures according to local conditions, with a view to achieving the effect of continuous increases in NDVI in Yan'an City and further enhancement of the ecological benefits of Yan'an City.

Keywords: NDVI; vegetation cover; spatio-temporal change; influencing factors; Yan'an City

植被作为重要的生态因子,既是气候变化的承受者,又对其具有反馈作用,在全球环境变化研究中起着“指示器”的作用^[1],对植被覆盖的时空变化及其驱动机制进行系统分析,可为研究植被—气候—人类活动之间的相互关系提供依据^[2]。用归一化植被指数 NDVI(normalized difference vegetation index)来估算植被覆盖度,可以反映植被的生长态势及其光合作用的强度^[3],在植被覆盖变化、土地退化、植被初级生产力等方面得到广泛应用^[4-5]。

植被生长与温度、降水等气候条件密切相关^[6]。植被 NDVI 与气候变化的关系研究始于 20 世纪初的柯本(Köppen)气候分类法,基于该分类法,Nicholson 等^[7]对植被 NDVI 变化与降水因子间的时间响应关系研究,发现植被 NDVI 变化与降水的一致性和相关性在季节尺度上较为显著。Ichii 等^[8]通过全球区域内温度变化与植被 NDVI 变化的相关性研究,发现植被 NDVI 变化对温度有着显著响应,尤其是在北半球的中纬度以上地区,存在着植被 NDVI 在季节尺度上受温度影响较为显著的现象。同一时期,国内学者针对不同区域、利用不同精度的植被 NDVI 数据对影响植被覆盖变化的气候因素也进行了大量研究^[9-11]。植被覆盖变化是自然因素和人类活动综合作用的结果,进入新世纪以来,人类活动对全球生态系统产生明显的影响。目前,在国内外诸多研究中,关于气候变化影响植被覆盖的驱动机制相对较多,而人类活动对植被 NDVI 变化影响的研究相对

较少^[12-16]。“绿水青山就是金山银山”,中国黄土高原地区一直是生态环境问题研究的重点^[17],众多学者在研究国内植被覆盖变化时,多集中在包括黄土高原范围在内的较大尺度,能够较好地评价植被覆盖的宏观区域变化,有利于国家进行宏观决策,而要进行具体的植被建设恢复工作,还需在更小尺度上做进一步的调查研究。因此,本文基于延安市 2000—2020 年 MODIS-NDVI 数据及其同期气象插值数据等,采用处理和规避误差效果较好的 Sen 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、相关性分析以及地理探测器分析等方法,对延安市植被覆盖时空变化特征及其影响因素进行研究,正确认识气候变化对延安市植被覆盖的影响,合理评价退耕还林还草等生态恢复工程的实施效果,为延安市进一步生态恢复工程的实施提供科学支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

延安市位于陕西省北部,黄土高原腹地($35^{\circ}21'—37^{\circ}31'N, 107^{\circ}41'—110^{\circ}31'E$),北接榆林市,南连铜川、渭南、咸阳市,东西分别与山西省、甘肃省为邻。总面积约 $3.70 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要为丘陵沟壑地貌,地表支离破碎,沟壑纵横,水土流失严重,耕地立地条件差,植被稀少,是中国退耕还林还草的重点区域。地势西北高东南低,平均海拔约 1 200 m,主要山脉有北部白于山、西部子午岭、东南部黄龙山及纵贯本区中部的崂山;属温带大陆性季风气候区,北部为半干

旱区,南部为半湿润区,夏季温热多雨,冬季寒冷干燥,年均降水量 500 mm 左右;境内河流以北洛河、延河、清涧河及无定河为主^[18]。

1.2 数据来源与预处理

遥感数据采用 MOD13Q1 植被指数合成产品,广泛应用于区域植被覆盖变化研究,来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 250 m × 250 m,时间尺度为 16 d,时间跨度是 2000—2020 年。首先,通过 ArcGIS 和 ENVI 软件对遥感数据进行解译,并对解译结果进行验证和精度评估,之后使用 MRT(MODIS 转换工具)对获取的 MODIS-NDVI 数据进行批量拼接、格式以及投影转换^[19];然后,通过 Matlab 批量进行 SG 滤波、NDVI 质量控制,以减少传感器的影响,提高数据的准确度,处理完的数据再通过 ENVI 的 Band Math(非批量方法)排除异常值,使植被 NDVI 值分布在 0~1 之间,之后采用 MVC(最大化合成方法)减少大气的云、阴影、颗粒、视角以及太阳高度角的影响来提高数据的准确度;最后,在 ArcGIS 软件中利用延安市行政边界进行批量裁剪,获得 2000—2020 年延安市逐年、逐月以及生长季(4—10 月)植被 NDVI 数据。气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)。首先,在 ArcGIS 中通过创建 NETCDF 栅格图层加载数据,然后通过图层属性导出获得 2000—2020 年延安市逐年、逐月气温和降水数据。延安市行政边界等基础地理信息数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn>)。利用 ArcGIS 打开获取的 2020 年地市级行政边界数据,选取市属性值为延安市的数据进行输出,即可获得延安市行政边界。延安市生产总值、常住人口数据来源于延安市统计年鉴,造林面积数据来源于中国林业和草原统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 为反映延安市近 21 a 的植被覆盖变化趋势,通过 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验方法对延安市生长季植被 NDVI 数据进行系统分析。在分析过程中,对处理后的两幅图像进行叠加以反映植被覆盖的变化方向和显著性程度。Sen 斜率估计是基于非参数统计的趋势计算方法^[20],常被用于长时间序列数据的趋势分析和检验,该方法较为稳健、效率高,对于离群数据和测量误差不敏感^[21],计算公式为:

$$\beta = \text{mean} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (\forall j > i) \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 为长时间序列数据; β 表示斜率。本文

在对植被 NDVI 数据进行处理时,用 SNDVI 表示相应的斜率值,依次用 $\text{SNDVI} < 0, \text{SNDVI} = 0, \text{SNDVI} > 0$ 表示植被退化、稳定、改善。

Mann-Kendall 是一种非参数统计检验方法^[22],适合于顺序变量的研究,其具有不需要样本遵从一定的分布,受异常值干扰较小等特点^[23]。近年来, Mann-Kendall 检验常被用于判断径流、降水、气候等的变化趋势的显著性。其统筹检验方法如下:

对于时间序列 $X_i, i=1, 2 \cdots i \cdots j \cdots n$ 。定义标准化检验统计量 Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_i, x_j 为长时间序列数据; n 为数据个数,本文研究延安市近 21 a 的植被 NDVI 数据, $n \geq 8$,检验统计量 S 近似为正态分布,其均值和方差为:

$$E(S) = 0 \quad (5)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

在给定显著性水平 α 下,如果 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,表明时间序列数据存在显著的变化趋势, $Z_{1-\alpha/2}$ 表示在置信水平 α 下标准正态函数分布表对应的值。在显著性检验方法的基础上,参考相关文献^[24]选取 $|Z_s| = 1.96$ 作为显著性的划分,分别用 $|Z_s| \leq 1.96, |Z_s| > 1.96$ 表示植被状况变化不显著、显著。

1.3.2 相关性分析 气温、降水等气候因子是影响植被 NDVI 变化的主要自然因素,它们会表现在植被类型、数量、质量等方面,从而在长时间序列上对植被覆盖产生空间性和动态性的差异,通过相关性分析可以独立反映单个因子与植被 NDVI 之间相关性的方向和程度^[25],其计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: R_{xy} 表示变量 x 和 y 的相关系数; n 为研究时间的年数; x_i 表示第 i 年的植被 NDVI 值; y_i 表示第 i 年的气候因子的值(降水量/mm 和温度/°C); \bar{x}, \bar{y} 分别表示植被 NDVI 和气候因子 n 年的平均值。

1.3.3 地理探测分析 植被覆盖的变化是多种因素综合作用的结果,采用地理探测器对影响因子进行综合分析可进一步完善相关性分析对单个因子所研究的内容,从而表达多因子之间的相互组合对延安市植被覆盖所产生的影响。地理探测器是用来探测空间分异性、揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[26],包括 4 个探测器:

(1) 因子探测。用于探测变量的空间分异性以及探测某影响因子 X 对属性 Y 空间分异的解释程度。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (8)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (9)$$

式中: $h=1, 2 \dots n$; L 为变量 Y 或因子 X 的分层; N_h, N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差; SSW, SST 分别为层内方差之和及全区总方差; q 的值域为 $[0, 1]$, q 的值越大说明 Y 的空间分异性越明显^[27]。

(2) 交互作用探测。用于识别不同风险因子 X_1, X_2 之间协同作用对因变量 Y 产生的影响,即评估不同因子共同作用时对因变量 Y 的解释程度与单因子作用时是否存在差异。评估方法为:分别计算不同风险因子 X_1 和 X_2 对因变量 Y 的 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 然后计算它们交互时的 $q(X_1 \cap X_2)$, 最后对 $q(X_1), q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较。

(3) 风险区探测。用于判断两个子区域的属性均值是否具有显著的差别,用 t 统计量来检验,可以用于搜索植被较好的区域。

(4) 生态探测。用于比较两因子 X_1 和 X_2 对属性 Y 的空间分布的影响是否有显著的差异,以 F 统计量来衡量。

2 结果与分析

2.1 延安市植被 NDVI 时空变化分析

2.1.1 植被 NDVI 时间变化特征 从批处理得到的延安市 2000—2020 年长时间序列植被 NDVI 栅格数据中,集中提取植被 NDVI 年均值进行观察,得到延安市近 21 a 的植被覆盖年际变化情况(图 1)。植被 NDVI 总体呈上升趋势($R=0.927 1, p<0.01$),增速为 $10\%/10 \text{ a}$, 植被状况不断改善,其中 2000—2007 年、2009—2011 年间的植被 NDVI 均低于总体均值,2008 年和 2011—2020 年间的植被 NDVI 均高于总体均值;2002, 2005, 2007, 2009, 2010, 2011, 2015, 2019 和 2020 年相较于上一年份的植被覆盖有所下降,其余年份植被覆盖相较于上一年份均有所上

升,其中 2009 年前后所表现出来的先下降后上升的变化特征,与 2009—2010 年的大范围干旱事件有关^[28]。进一步提取 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年植被 NDVI 月数据进行观察,得到植被覆盖年内变化情况(图 2),表明植被 NDVI 在 1—3 月缓慢增加或稳定不变(0.2 左右),在 4—8 月显著上升,并于 7—8 月达到最大值(0.5 以上),在 9—12 月不断下降(0.2 左右),这与自然植被一般春季开始变绿、夏季生长茂盛、秋季开始落叶的季节周期性变化特征相适应。

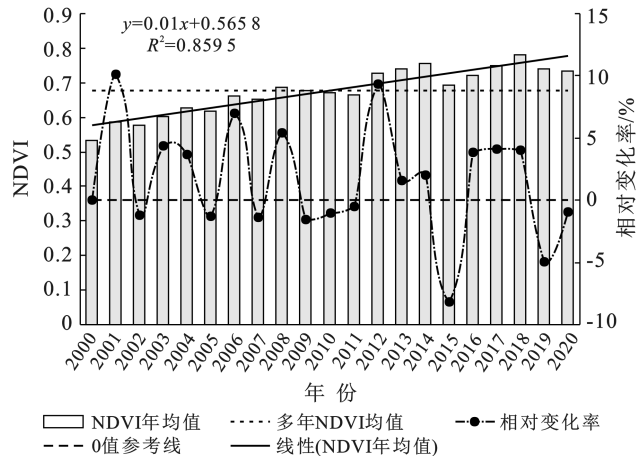


图 1 延安市 2000—2020 年植被 NDVI 年际变化
Fig.1 Interannual variation of vegetation NDVI in Yan'an City during 2000—2020

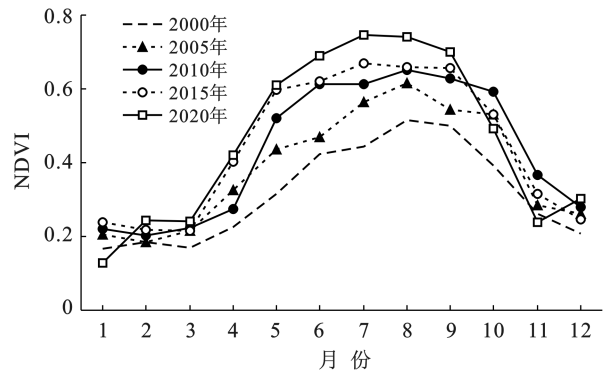


图 2 延安市植被 NDVI 年内变化
Fig.2 Intra-year variation of vegetation NDVI in Yan'an City

2.1.2 植被 NDVI 空间变化特征 由于目前尚无统一的植被覆盖度等级阈值划分标准,本文在参照相关文献^[29-31]的基础上,结合延安市特有的生态环境特点,按照植被 NDVI 处于 $0 \sim 0.4, 0.4 \sim 0.6, 0.6 \sim 0.8, 0.8 \sim 1.0$ 划分为低、中低、中、高植被覆盖度 4 个等级。

初步选取 2000—2020 年相同时间间隔的五个年份观察延安市植被 NDVI 空间变化(图 3),可以得

到,延安市植被覆盖空间分布差异较为明显,总体呈现“南高北低,东高西低”的特点,这与黄土高原呈现东南高西北低、从东南向西北逐渐减少的时空变化规律相吻合^[12-16]。另外,可以发现近 21 a 从东南和西

南向北植物群落恢复较为显著,表现为植被覆盖度从低和中低向中和高等级转变较为快速,其中 2020 年呈现出较大的中和高植被覆盖度范围,中低和低植被覆盖度范围极少。

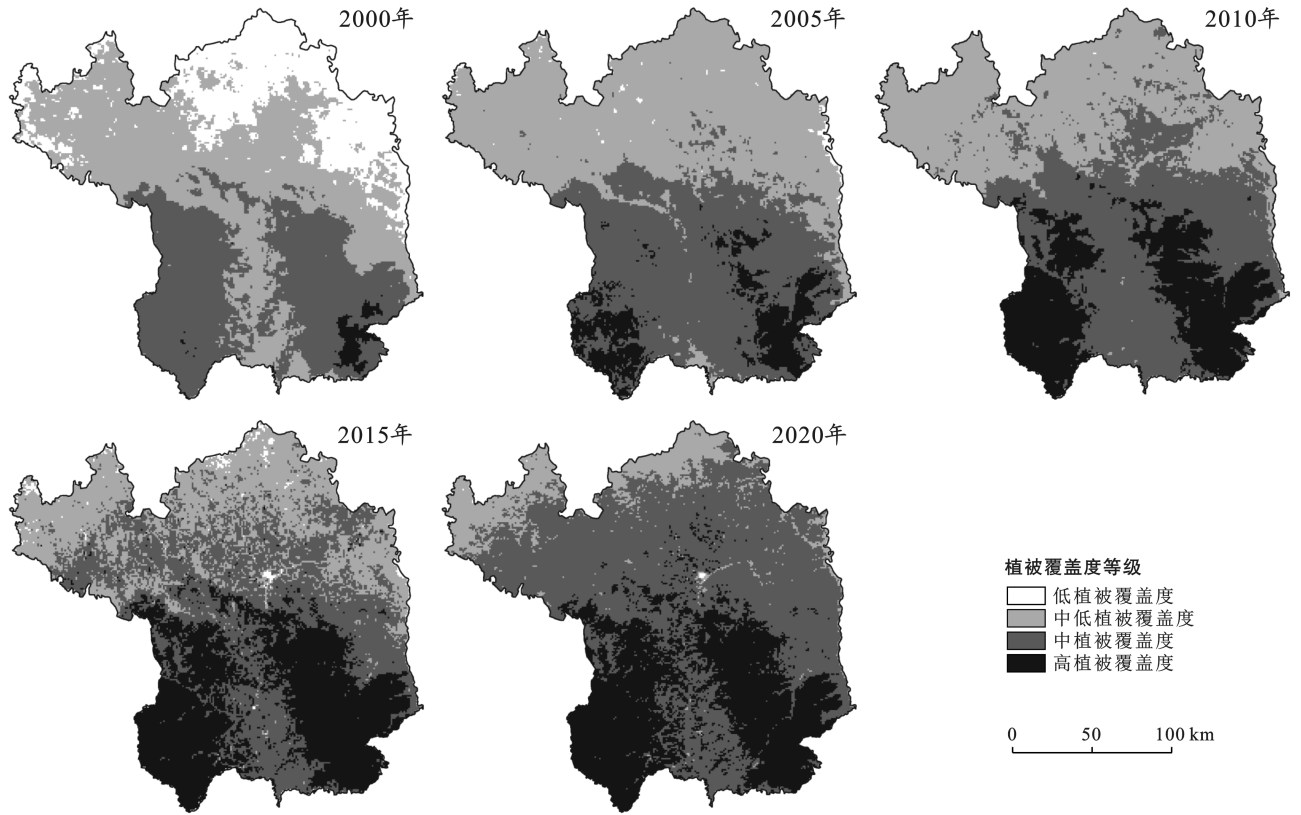


图 3 延安市重分类后的不同植被覆盖度等级范围

Fig.3 Range of different vegetation coverage grades after reclassification in Yan'an City

进一步统计不同植被覆盖度等级的像元数可以得到,近 21 a 延安市低和中低植被覆盖度范围分别下降 27.567%和 31.859%,中和高植被覆盖度范围分别上升 22.511%和 30.914%。观察不同植被覆盖度范围的趋势变化(图 4)可以得到,高覆盖度范围相较于中覆盖度范围的增长较为快速,增长趋势较为稳定、年际变化的波动范围也较小,中低覆盖度范围在 2005 年以前稳定在 50%左右,而在 2005 年以后开始显著下降,并于 2013 年下降至最低的 1.902%,同时自 2005 年以后低植被覆盖度范围一直近乎接近于 0,这表明延安市植被恢复取得了较好的阶段性成果,对延安市生态环境保护 and 绿色发展意义重大。

2.1.3 植被 NDVI 变化趋势特征 为进一步反映延安市近 21 a 的植被覆盖变化趋势,通过 Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验方法对延安市生长季植被 NDVI 数据进行分析^[32],得到最终趋势变化图像(图 5),并对其进行像元统计(表 1)。延安市植被覆盖呈现不断改善的趋势,植被状况不断优化,改善

和退化的面积比例分别为 99.457%和 0.330%,其中明显改善的面积占 97.846%,轻微改善的面积占 1.611%,轻微退化的面积占 0.271%,严重退化的面积占 0.059%,稳定不变即没有发生显著变化的区域占 0.213%。

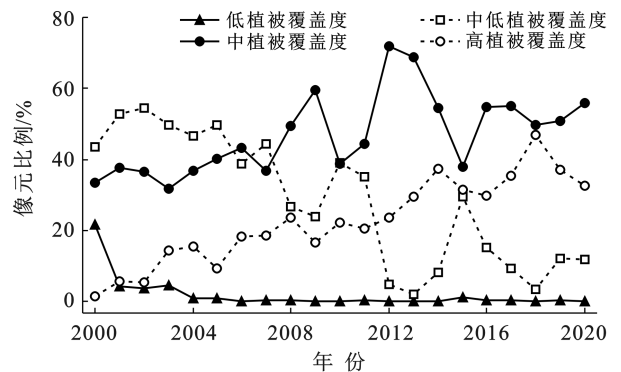


图 4 延安市不同植被覆盖度等级范围的年际变化

Fig.4 Annual variation of different vegetation coverage in Yan'an City

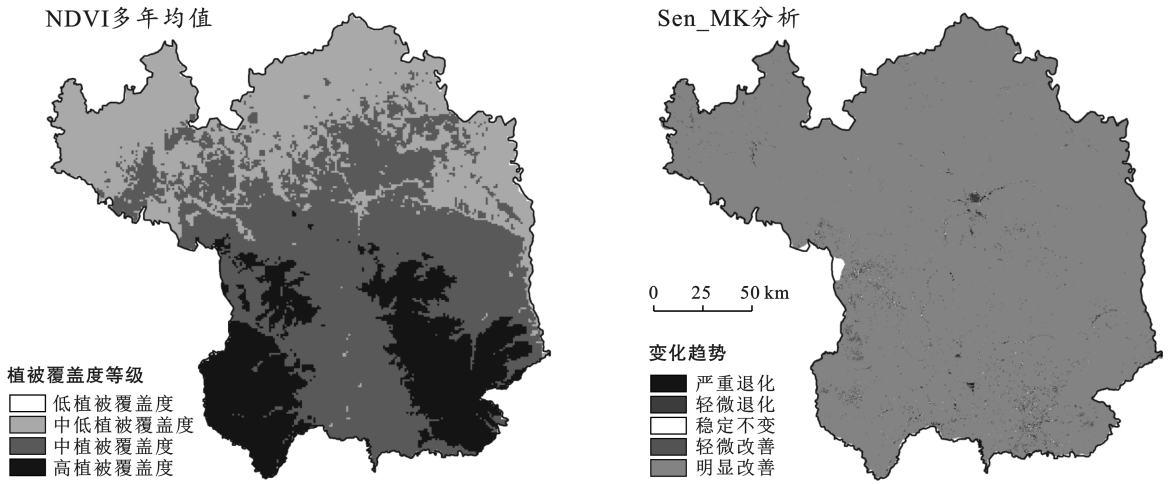


图 5 延安市植被 NDVI 多年均值及 Sen_MK 分析

Fig.5 Multi-year mean NDVI of vegetation and Sen_MK analysis in Yan'an City

表 1 植被 NDVI 变化趋势统计

Table 1 Vegetation NDVI change trend statistics in Yan'an City

SNDVI	Z 值	NDVI 变化趋势	面积比例/%
SNDVI>0	Z >1.96	明显改善	97.846
SNDVI>0	Z ≤1.96	轻微改善	1.611
SNDVI=0	Z	稳定不变	0.213
SNDVI<0	Z ≤1.96	轻微退化	0.271
SNDVI<0	Z >1.96	严重退化	0.059

2.2 影响因素分析

2.2.1 植被 NDVI 变化对气候因素的响应 对于区域研究来说,影响植被 NDVI 变化的自然因素主要是气温、降水等气候因子,它们会表现在植被类型、数量、质量等方面,从而在长时间序列上会产生空间性和动态性的差异。延安市位于黄土高原的核心区域,常年丰富的光能资源基本上能满足地表植被生长发育的需要,而水资源是生态建设和生态恢复的关键因素,因此本文在探究影响延安市植被变化的因素时把

气温、降水作为主要的气候因子(图 6),基于像元尺度采用相关性分析方法得到(图 7);延安市植被 NDVI 与气温的相关系数呈现明显的由东到西递减的趋势,分布在 -0.60~0.70 之间, -0.2~0.2 的像元占 75.01%,空间平均相关系数为 -0.01,其中呈正相关的面积占 47.52%,主要分布在延安市的东部以及西北部分地区,呈负相关的面积占 52.48%;与降水的相关系数呈现出从西北向东南递减的趋势,分布在 -0.23~0.91 之间,0.2~0.4 的像元占 63.96%,空间平均相关系数为 0.28,其中呈正相关的面积占 99.62%,呈负相关的面积仅为 0.38%。延安市内绝大部分区域植被 NDVI 与降水呈正相关关系,与降水的正相关性显著强于气温,表明降水是影响延安市植被 NDVI 的主要气候因子。另外,植被 NDVI 与气温和降水呈现较强的一致相关性,这进一步说明降水和气温是影响区域植被 NDVI 时空差异性分布的主要气候因子。

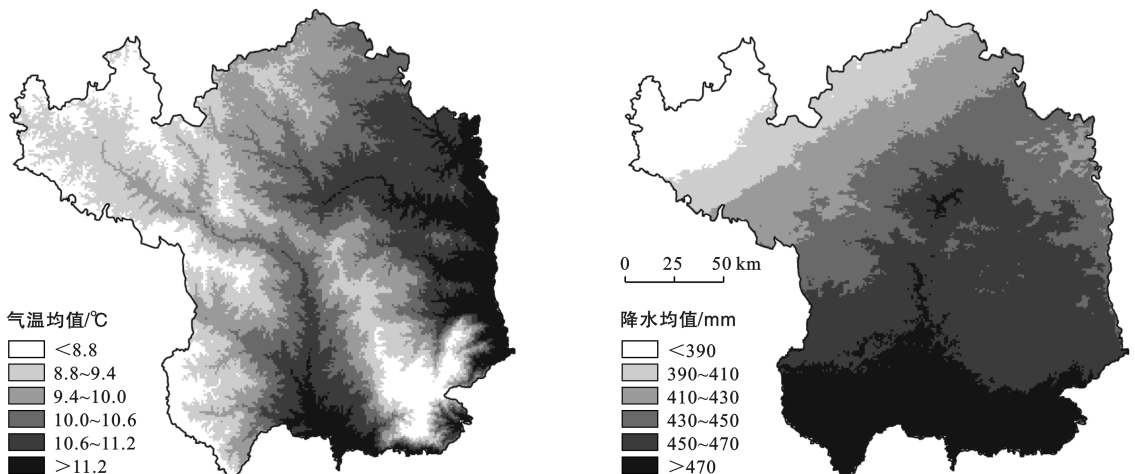


图 6 延安市 2000—2020 年多年气温均值及多年降水均值

Fig.6 Mean annual temperature and mean annual precipitation in Yan'an City from 2000 to 2020

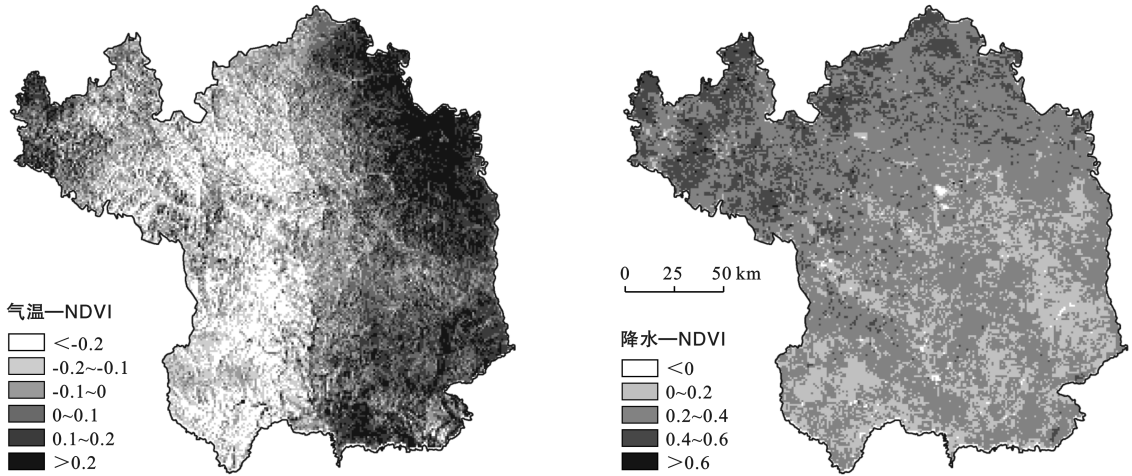


图 7 延安市气温、降水与植被 NDVI 的相关系数

Fig.7 Correlation coefficients between temperature, precipitation and vegetation NDVI in Yan'an City

2.2.2 植被 NDVI 变化对人类活动的响应 人类活动对植被覆盖的影响具有两面性。一方面截至 2020 年延安市已累计完成退耕还林面积 $6.72 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全市国土总面积的 19.4%, 植被覆盖度由 46% 提高到 81.3%; 另一方面快速城镇化所带来的城市人口不断集聚, 住房、交通等基础设施的构建也会对植被覆盖状况产生一定影响。同时由于人类活动的主观性较强, 相应的人类活动类型也较多, 所以直接考虑各种不同的人类活动对植被 NDVI 变化产生的影响难度较大, 本文运用残差趋势分析方法探究人类活动对延安市植被覆盖变化产生的影响, 即在植被 NDVI 的栅格像元和同期气温、降水等主要气候因素间通过回归分析进行计算, 得到基于像元计算的 NDVI 预测值(气候因子对 NDVI 的贡献部分), 然后通过遥感 NDVI 真实值(NDVI_{obs})与 NDVI 预测值(NDVI_{pre})相减得到残差值(NDVI_{res} , 人类活动对 NDVI 的影响), 剥离气候变化和人类活动产生的影响(表 2)可以得到, 近 21 a 延安市 NDVI 残差值呈现不断增长的变化趋势, 增速为 9.5%/10 a, 并于 2012 年以后稳定在 0 以上, 表明人类活动对延安市植被生长状况的改善作用开始不断显现, 且改善作用的效果愈加明显。

2.2.3 植被 NDVI 变化的多影响因素地理探测分析 植被生长与气温、降水等气候条件密切相关, 同

时海拔高度、坡度、坡向等自然地理因素也会对植被覆盖产生一定的影响, 植被覆盖变化受到多种因素的综合作用, 故在分析植被 NDVI 对气温、降水等主要气候因素以及人类活动的响应之后, 仍需对诸如气温、降水的交互作用以及气候变化、自然地理因素、人类活动之间的协同作用进行分析, 因此将各影响因素进一步细化为多影响因子, 使用地理探测器来探测多影响因子对延安市植被分布和变化的影响以及因子之间的交互作用。选取 2010, 2015, 2020 年各影响因子即自变量(表 3), 利用地理探测器进行定量分析。

表 2 残差趋势分析预测的 NDVI 残差值

Table 2 NDVI residuals predicted by residual trend analysis

年份	NDVI 残差值	年份	NDVI 残差值
2000	-0.125	2011	-0.027
2001	-0.087	2012	0.069
2002	-0.095	2013	0.055
2003	-0.104	2014	0.067
2004	-0.034	2015	0.034
2005	-0.048	2016	0.049
2006	-0.012	2017	0.056
2007	-0.032	2018	0.112
2008	0.032	2019	0.047
2009	0.000	2020	0.052
2010	-0.008		

表 3 影响因子的选择

Table 3 Selection of influence factors

项目	气候因素		自然地理因素			人类活动		
	气温	降水	高程	坡度	坡向	常住人口	生产总值	造林面积
因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8

(1) 因子探测分析。利用因子探测分析各因子对植被覆盖变化的影响(表 4), 可以得到延安市植被

分布和变化的影响因素排序: 人类活动 > 气候因素 > 自然地理因素, 其中造林面积对植被状况改善最为显

著,降水作用次之。近年来两者驱动力有所下降。气温和自然地理因素作用较小,但驱动力不断上升,由于气候对植被的影响不具有坡度选择性,因此自然地理因素影响的不断上升也从侧面反映了延安市退耕还林工程的实施效果。综合来看,尽管近年来气候和人类活动的驱动力有所下降,但仍是影响延安市植被分布和变化的主要驱动力,进一步将各影响因子对延安市植被分布和变化的影响程度排序:①2010 年排序为:造林面积(0.737) > 降水(0.612) > 生产总值(0.342) > 常住人口(0.202) > 高程(0.042) > 坡度(0.018) > 坡向(0.011) > 气温(0.010); ②2015 年排序为:造林面积(0.656) > 降水(0.477) > 生产总值(0.234) > 常住人口(0.173) > 高程(0.066) > 坡度(0.018) > 气温(0.011) > 坡向(0.010); ③2020 年排序为:造林面积(0.547) > 降水(0.477) > 常住人口(0.149) > 高程(0.092) > 生产总值(0.084) > 气温(0.044) > 坡度(0.019) > 坡向(0.012)。

(2) 交互探测分析。利用交互探测分析多影响因子对植被覆盖变化的影响(图 8),通过长时间数据序列的构建不断促进各影响因子之间的优化组合,识别影响植被恢复力的关键参数,为延安市“山水林田湖草沙”生态保护修复措施的精准实施提供科学指标和理论阈值。观察各因子对植被覆盖变化的解释力以及不同因子之间的交互作用可得:影响因子的两两组合对延安市植被覆盖变化表现为非线性增强或双因子增强;其中 2010 年造林面积和气温、高程、坡向为主导交互作用,2015 年造林面积和坡度、气温、高程为主导交互作用,2020 年造林面积和气温、坡向、

高程为主导交互作用;降水和坡度在 2010 年表现为双因子增强,在 2015 年和 2020 年表现为非线性增强;生产总值和常住人口在 2010 年表现为非线性增强,在 2015 和 2020 年表现为双因子增强;造林面积和高程在 2015 年表现为双因子增强,在 2010 年和 2020 年表现为非线性增强。中国的退耕还林还草等生态恢复工程主要应用在 6°~15°和 15°~25°的坡度之间,近年来造林面积和高程、坡度的组合成为主导交互作用,可见延安市植被状况改善的一个重要原因是中国大规模生态恢复工程的实施以及农业结构和农业生产活动的不断优化,同时气温、降水等气候因子组合的影响不断降低,表明植被恢复配套措施的实施使得延安市植被覆盖对气候因子变化的敏感性程度不断减弱,这为延安市进一步推进生态恢复工程的实施奠定了基础。

表 4 延安市不同年份影响因子对植被 NDVI 分布和变化的影响程度

Table 4 Effects of factors on NDVI distribution and change in different years in Yan'an City

探测因子	2010	2015	2020
X_1	0.010	0.011	0.044
X_2	0.612	0.477	0.421
X_3	0.042	0.066	0.092
X_4	0.018	0.018	0.019
X_5	0.011	0.010	0.012
X_6	0.202	0.173	0.149
X_7	0.342	0.234	0.084
X_8	0.737	0.656	0.547

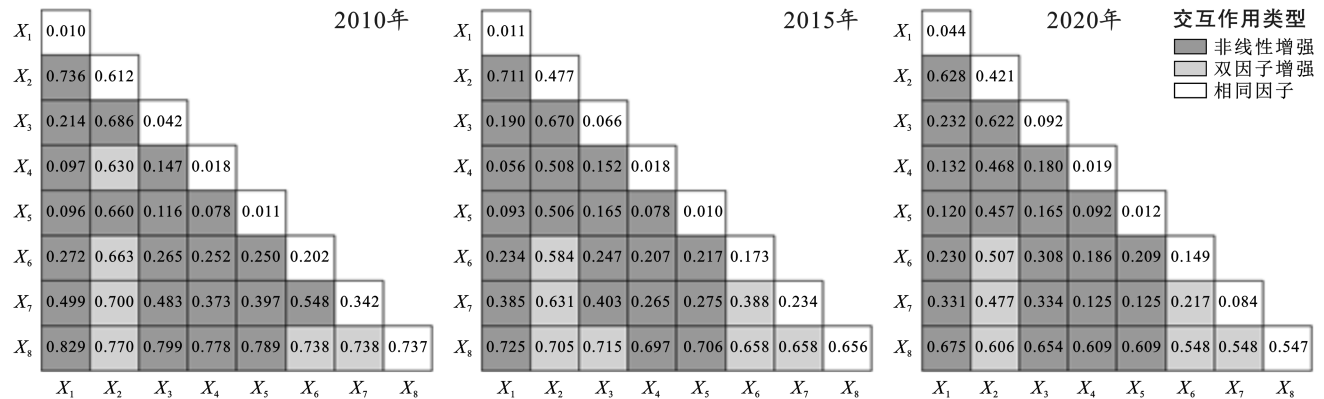


图 8 交互探测中影响因子的解释力及交互作用类型

Fig.8 Explanatory power and interaction types of influence factors in interactive detection

3 讨论与结论

3.1 讨论

进入新世纪以来,随着延安市开始实施退耕还林

(草)工程,延安市植被 NDVI 与气温、降水等气候因子之间的相关关系开始发生变化。如图 9 所示,延安市在 2000—2020 年间年均气温相对稳定,增长趋势较为缓慢,降水量近年来总体有所上升,但趋势并不

明显,基本维持在 520 mm,即近 21 a 延安市气候条件相对稳定,但植被覆盖状况不断得到改善,可见人类活动产生的影响日益明显,植被覆盖对气候因子变化的敏感性程度开始不断减弱。其次本文在分析气温、降水与植被 NDVI 的相关性时,由年际变化之间的关系得到植被 NDVI 与降水的正相关性显著强于气温,降水是影响延安市植被分布的主要气候因子,而年内影响植被生长的限制因子会有所不同:冬季和春季气温较低,温度是主要的限制因子;夏季和秋季气温适宜,降水是主要的限制因子。同时,在分析

2002, 2005, 2007, 2009, 2010, 2011, 2015, 2019 和 2020 年相较于上一年份植被覆盖发生较大变化的原因时,还应考虑极端气候所带来的影响。最后,下一步还应使用多种不同的 NDVI 数据源进行相互验证,以判断结果的一致性和不确定性,同时由于分辨率较小,对不同植被类型的解释能力有限,生态恢复工程实施后不同植被类型之间的相互转换情况不能精准定位,为进一步开展植被生态效益的统计还有提升的空间,因此延安市植被覆盖的时空变化及其驱动机制还需进一步研究。

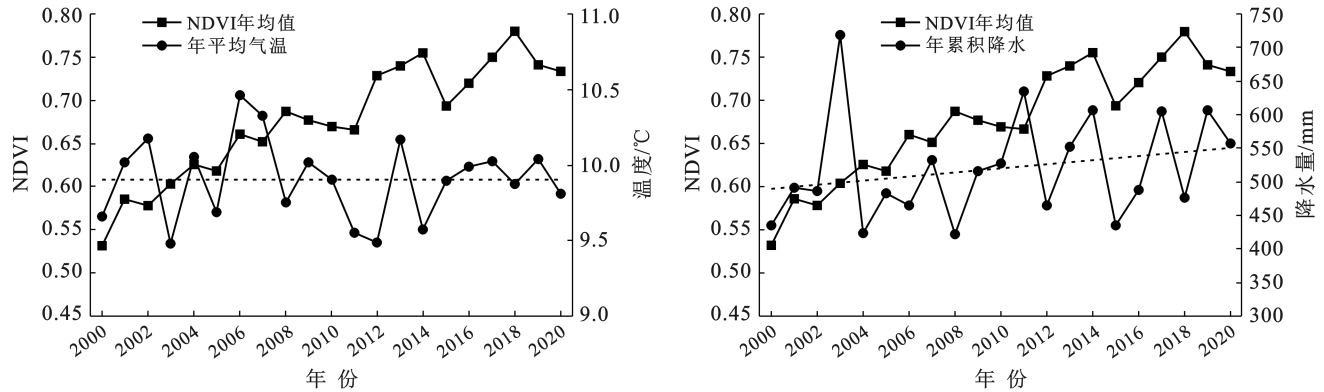


图 9 延安市平均气温、降水量和 NDVI 趋势变化

Fig.9 Trend changes of average temperature, precipitation and NDVI in Yan'an City

3.2 结论

(1) 2000—2020 年延安市植被覆盖状况不断改善,生态恢复工程取得了较好的实施效果。其中在 2000—2010 年生态恢复工程初级阶段,植被恢复较为缓慢,年植被 NDVI 值与多年均值相比较低,植被覆盖等级由低和中低向中和高等级转换速度较缓;2010—2020 年生态恢复工程推进阶段,植被恢复较为快速,年植被 NDVI 值均高于多年均值,中和高植被覆盖度等级开始逐渐取代低和中低植被覆盖度等级,生态恢复效果开始逐渐显现。

(2) 植被覆盖变化受到气候因素和人类活动的综合作用。受水热分布的影响,延安市“南高北低,东高西低”的植被分布格局依旧较为明显,植被 NDVI 与降水的相关性显著强于气温。近年来延安市 NDVI 残差值呈增长趋势,人类活动对植被覆盖产生的影响日益剧烈。

(3) 退耕还林还草等生态恢复工程的有效实施对延安市植被状况改善最为显著,降水作用次之,气温和自然地理因素作用较小。气温、降水等气候因子交互作用产生的影响不断降低,表明延安市植被覆盖对气候因子变化的敏感性程度开始不断减弱,这为延安市进一步推进生态恢复工程的实施奠定了基础。

[参 考 文 献]

- [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 时间序列数据分析[J].遥感学报,1998,2(3):204-210.
- [2] 谢宝妮.黄土高原近 30 年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [3] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等.近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2018,41(1):99-108.
- [4] 木热提江·阿不拉,张晓萍,陈利利,等.基于 GIMMS NDVI 的黄土高原地区荒漠化时空特征分析[J].中国水土保持科学,2015,13(3):24-31.
- [5] 徐茜,杨忍,任志远.黄土高原地区 NPP 的自然影响因素分析[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):244-250.
- [6] 余荔.窟野河流域植被覆盖变化及其对径流影响[D].湖北 武汉:华中农业大学,2011.
- [7] Nicholson S E, Davenport M L, Malo A R. A comparison of the vegetation response to rainfall in the sahel and east-africa, using normalized difference vegetation index from Noaa Avhrr [J]. Climatic Change, 1990, 17(2/3): 209-241.
- [8] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982—1990 [J]. International Journal of Remote

- Sensing, 2002, 23(18): 3873-3878.
- [9] 杨胜天,刘昌明,孙睿.近20年来黄河流域植被覆盖变化分析[J].地理学报,2002,57(6):679-684.
- [10] 李春晖,杨志峰.黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J].地理研究,2004,23(6):753-759.
- [11] 刘绿柳,肖风劲.黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化[J].生态学杂志,2006,25(5):477-481.
- [12] 吴云,曾源,吴炳方,等.基于 MODIS 数据的三北防护林工程区植被覆盖度提取与分析[J].生态学杂志,2009,28(9):1712-1718.
- [13] 陈效述,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.
- [14] 王朗,傅伯杰,吕一河,等.生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2010,21(8):2109-2116.
- [15] Wang L, D'odorico P, Evans J P, et al. Dryland ecohydrology and climate change: critical issues and technical advances [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(160): 2585-2603.
- [16] 刘爽,官鹏.2000—2010 年中国地表植被绿度变化[J].科学通报,2012,57(16):1423-1434.
- [17] 高健翎,高燕,马红斌,等.黄土高原近 70 a 水土流失治理特征研究[J].人民黄河,2019,41(11):65-69,84.
- [18] 周璐红,王盼婷,曹瑞超.2000—2020 年延安市土壤侵蚀驱动因素分析及生态安全评价[J].生态与农村环境学报,2022,38(4):511-520.
- [19] 贾磊,姚顺波,邓元杰,等.渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):305-314.
- [20] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [21] 蔡博峰,于嵘.基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J].遥感学报,2009,13(6):1170-1186.
- [22] 王景才,郭佳香,徐蛟,等.近 55 年淮河上中游流域气候要素多时间尺度演变特征及关联性分析[J].地理科学,2017,37(4):611-619.
- [23] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.
- [24] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报,2013,33(24):7798-7806.
- [25] 龙慧灵,李晓兵,王宏,等.内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系[J].生态学报,2010,30(5):1367-1378.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [27] 张文琦,宋戈.三江平原典型区水田时空变化及驱动因素分析[J].农业工程学报,2019,35(6):244-252.
- [28] 赵瑞东.气候变化和人类活动对黄土高原植被 NDVI 的影响研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2018.
- [29] 刘宪锋,杨勇,任志远,等.2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J].中国沙漠,2013,33(4):1244-1249.
- [30] 李国亮.2000—2012 年黑河流域上游植被覆盖变化遥感监测与分析[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2015.
- [31] 张玉东,谭红兵.黄土高原典型干旱区退耕还林后植被覆盖变化研究[J].生态科学,2017,36(1):139-146.
- [32] 韩磊,火红,刘钊,等.基于地形梯度的黄河流域中段植被覆盖时空分异特征:以延安市为例[J].应用生态学报,2021,32(5):1581-1592.

(上接第 145 页)

- [34] 王政权,张彦东.水曲柳落叶松根系之间的相互作用研究[J].植物生态学报,2000,24(3):346-350.
- [35] Tang Yakun, Wu Xu, Chen Yunming, et al. Water use strategies for two dominant tree species in pure and mixed plantations of the semiarid Chinese Loess Plateau [J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(4), e1943.
- [36] Wang Jian, Fu Bojie, Wang Lixin, et al. Water use characteristics of the common tree species in different plantation types in the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 288/289: 108020.
- [37] 许秀丽,李云良,谭志强,等.鄱阳湖湿地典型中生植物水分利用来源的同位素示踪[J].湖泊科学,2020,32(6):1749-1760.