第 45 卷 第 4 期
2023 年 7 月

地 球 科 学 与 环 境 学 报
Journal of Earth Sciences and Environment

Vol. 45 No. 4
July 2023

潘金金,任宗萍,胥世斌,等. 宁夏不同植被类型 NDVI 变化特征及其对气候的响应[J]. 地球科学与环境学报,2023,45(4):819-832.
PAN Jin-jin,REN Zong-ping,XU Shi-bin,et al. Variation Characteristics of NDVI of Different Vegetation Types in Ningxia,China and Their Responses to Climate[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2023,45(4):819-832.

DOI:10.19814/j.jese.2022.08030

·环境与可持续发展专刊·

宁夏不同植被类型 NDVI 变化特征及其对气候的响应

潘金金[1],任宗萍[1*],胥世斌[2],李 鹏[1,3],张晓明[4],
许垚涛[1],任正龑[5]

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048;
2. 西吉县滥泥河流域水土保持试验工作站,宁夏 西吉 756200;
3. 西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,陕西 西安 710048;
4. 中国水利水电科学研究院,北京 100038; 5. 宁夏回族自治区水土保持监测总站,宁夏 银川 750002)

摘 要:定量分析植被覆盖变化的驱动机制,探索植被与气候因子之间的关系,对区域生态环境评价和水土保持具有重要意义。基于 1998~2019 年宁夏归一化植被指数(NDVI),采用趋势分析、偏相关分析和冗余分析方差分解等方法,研究不同植被类型 NDVI 时空变化特征及其驱动因子。结果表明:①宁夏 NDVI 整体呈波动上升趋势,NDVI 年增长速率为 0.007 1 年$^{-1}$,春季增长速率最低(0.002 3 年$^{-1}$),秋季增长速率最高(0.007 5 年$^{-1}$);针叶林、灌丛和荒漠 NDVI 在夏季增长速率最大,阔叶林、农田、草原和草甸 NDVI 在秋季增长速率最大。②在年际尺度上,93.4%的区域 NDVI 呈现改善趋势;不同季节内,春季植被退化严重,16.6%的植被面积呈现减少趋势,主要发生在北部引黄灌区,其他季节植被退化的区域集中在银川市周边;③气候是影响植被变化的主要因素,全年和春季 NDVI 与温度成正相关关系,夏季 NDVI 与温度成负相关关系,不同季节内 NDVI 与降水量均成正相关关系。

关键词:归一化植被指数;植被类型;时空变化;温度;降雨;方差分解;相关性;宁夏

中图分类号:Q948.112;X171.1;X87 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-6561(2023)04-0819-14

Variation Characteristics of NDVI of Different Vegetation Types in Ningxia, China and Their Responses to Climate

PAN Jin-jin[1], REN Zong-ping[1*], XU Shi-bin[2], LI Peng[1,3], ZHANG Xiao-ming[4],
XU Yao-tao[1], REN Zheng-yan[5]

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Xiji Indiscriminate Mud River Basin Soil and Water Conservation Test Workstation, Xiji 756200, Ningxia, China; 3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 5. Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

收稿日期:2022-08-18;**修回日期**:2022-11-13 **投稿网址**:http://jese.chd.edu.cn/
基金项目:国家自然科学基金项目(42077074,51879281)
作者简介:潘金金(1997-),女,河南信阳人,工学硕士研究生,E-mail:panjinjin16@163.com。
* **通讯作者**:任宗萍(1982-),女,山东潍坊人,副教授,理学博士,E-mail:renzp@xaut.edu.cn。

Abstract: It is important to quantitatively analyze the driving mechanisms of vegetation cover changes and explore the relationship between vegetation and climate factors for regional ecological environment evaluation and soil and water conservation. Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) in Ningxia from 1998 to 2019, the trend analysis, partial correlation analysis and variance decomposition of RDA were used to investigate the spatial-temporal variation characteristics of NDVI of different vegetation types and their driving factors. The results show that ① the annual growth rate of NDVI is 0.007 1 a^{-1}, with the lowest NDVI growth rate in spring (0.002 3 a^{-1}) and the highest NDVI growth rate in autumn (0.007 5 a^{-1}); the NDVI growth rates of coniferous forests, shrub and desert are the highest in summer, and the NDVI growth rates of broad-leaved forests, farmland, grasslands and meadows are the highest in autumn; ② on the annual scale, 93.4% of the regional NDVI show an improving trend; within different seasons, the vegetation degradation is serious in spring, 16.6% of the vegetation area show a decreasing trend, which mainly occur in the yellow irrigation area of northern Ningxia, and the degraded areas in other seasons are concentrated around Yinchuan city; ③ climate is the main factor affecting the vegetation change, NDVI is positively correlated with temperature throughout the year and in spring, while NDVI and temperature are negatively correlated in summer, and NDVI and precipitation are positively correlated in different seasons.

Key words: NDVI; vegetation type; spatial-temporal change; temperature; rainfall; variance decomposition; correlation; Ningxia

0 引 言

植被指数是评估生态系统脆弱性的重要指标，干旱区和半干旱区作为水分限制地区，其植被生长具有较大的季节与年际变化特征。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index，NDVI)能够真实地反映和评价植被生长状况，被广泛用于区域植被变化特征的研究[1-4]。作为植被生长发育所必须的因子，气候在植被活动变化中起着重要作用[5]。例如，Jiang 等对 1998～2018 年中国生态环境时空变化及其驱动因子进行了全面分析，认为降水量为 200～600 mm 的地区生态环境改善最快[6]；马晓妮等研究了黄土高原砒砂岩区 1999～2018 年 NDVI 变化，发现降水量、温度是影响该区植被覆盖空间分布的主导因素，除年际气候变化外，各季节的温度和降水量变化同样可以影响植被物候的年度循环[7]。

气候变化条件不同则植被脆弱性表现出不同的模式，为厘清植被与气候变量的关系，需要进一步研究不同季节内的植被变化特征。颜明等研究认为，黄河流域 NDVI 在年际尺度上具有增加趋势，且增加区域面积所占比例较高，而夏季、秋季具有增加趋势的区域较少，不同时间尺度 NDVI 变化趋势并不完全相同[8]。Karnieli 等将地表温度表示的能量看作气温，通过研究欧洲长期植被与温度的空间和季节分布，得出春季 80%的生物群系与温度显示出显著正相关关系，而夏季大多数生物群落与温度成负相关关系[9]。然而，植被生长的响应不仅取决于气候条件和气候变化趋势，还取决于植被的生物特征[10-12]。例如，在青藏高原东部，草甸的径向生长受到气候变暖的促进，而草原的径向生长受气候变暖的影响造成生长期缩短[13]。而 Girardin 等研究发现，升温虽然促进植被生长，但植被的生长同时受土壤水分的有效性、植被呼吸、CO_2 浓度等因素的抑制[14]。由于植物生长特性的差异，不同植被类型 NDVI 对气候和人类活动的响应也不尽相同[15-16]。现有研究通常把某一区域 NDVI 作为总体考虑，探讨植被覆盖变化及其驱动因子，虽然为评估生态系统演变提供了参考，但由于缺乏对不同植被类型的考虑，在区域植被评估与建设中无法提供精准指导，亟需加强对不同植被类型 NDVI 的研究工作。因此，了解不同生物群落对气候变化的不同响应，对于了解植被与气候变化的关系至关重要。

黄河流域生态脆弱[17]、干旱缺水[18]、人类活动压力大[19]。经过多年的治理，黄河流域生态环境得到改善，但仍普遍处于中等生态脆弱性水平，且呈现明显的地理空间分异[20]。宁夏作为建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区，生态环境质量呈现

不断变好趋势，但气候变暖改变了宁夏区域植被分布格局，进而影响黄河流域生态环境[21]。为进一步了解宁夏不同植被类型生长变化趋势及其主要驱动因子，本文基于 1998～2019 年 NDVI 数据，采用趋势分析、相关分析及冗余分析（Redundancy Analysis，RDA）等方法，对宁夏不同植被类型在不同季节（春季、夏季、秋季、全年）内 NDVI 的变化趋势及空间分布特征进行分析，并结合地形、地理和气候因子等，探讨影响不同植被类型 NDVI 变化的主要驱动因子，为建设宁夏黄河流域生态保护和高质量发展先行先试区提供科学依据。

1　研究区概况

宁夏位于黄河流域上游，纬度范围为 35°14′N～39°23′N，经度范围为 104°17′E～107°39′E（图 1），下辖 5 个地级市，形状呈南北长、东西窄，南北跨度约 456 km，东西跨度约 250 km，总面积为 6.64×10^4 km^2。宁夏属温带大陆性干旱半干旱和半湿润地区，年平均气温为 7.5 ℃～10.2 ℃，自南向北递增；年降水量为 177.6～690.2 mm，自南向北递减。宁夏海拔为 956～3 538 m，地势呈现西南高、东北低的分布特点，南北地势最大高差为 2 582 m。受气候和地形共同影响，宁夏植被类型以农田、荒漠和草原为主，在南部和北部山区还分布有一些针叶林和阔叶林。

2　数据来源与分析方法

2.1　数据来源

本研究所用的 NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（网址为 https://www.resdc.cn/），数据类型是空间分辨率为 1 km 的长时间序列 SPOT/Vegetation NDVI 卫星遥感数据。该数据在月尺度的基础上采用最大合成法生成 1998～2019 年不同季节及不同年份 NDVI 数据，并通过投影变换、镶嵌、裁切等处理得到宁夏 NDVI 数据集。

气象数据来源于国家气象科学数据中心（网址为http://data.cma.cn/），该数据集包括气压、温度、降水量、空气湿度、风速等气候因子。本研究采集了宁夏和周边省区共 42 个气象站点 1998 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的日降水量和温度数据，将日尺度数据处理为月尺度数据，通过 ANUSPLIN 软件插值生成 1998～2019 年各年平均温度、年总降水量和不同季节内温度、降水量均为 1 km 分辨率的栅格空间数据集，实现数据空间分辨率的统一。

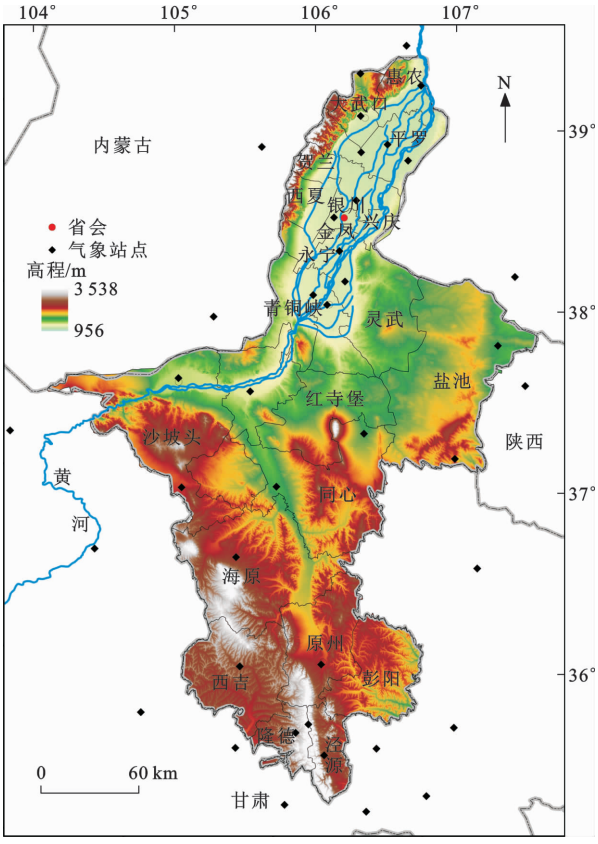


图 1　宁夏地理位置及高程分布

Fig. 1　Geography Location and Distributions of Elevation of Ningxia

DEM 数据来源于地理空间数据云（网址为 https://www.gscloud.cn/），空间分辨率为 30 m。对 DEM 数据重采样为 1 km，并通过镶嵌、裁切等处理得到研究区 DEM 数据；基于 DEM 在 ArcGIS 软件中获取本研究所需的地形因子（高程、坡度、坡向）。地理因子（经度、纬度）由栅格转点计算而来。

植被类型数据于 2001 年正式发行，来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，空间分辨率为 1 km。该数据反映了我国 11 个植被类型组，分别是针叶林、针阔叶混交林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原、草丛、草甸、沼泽、高山植被、栽培植被。本文将栽培植被归为农田。据此，宁夏植被类型可被划分为农田（面积为 2.4×10^4 km^2，占比 35.7%）、荒漠（1.7×10^4 km^2，25.0%）、草原（2.2×10^4 km^2，32.6%）、灌丛（2 296.9 km^2，3.5%）、草甸（944.1 km^2，1.4%）、针叶林（368.7 km^2，0.6%）和阔叶林（512.2 km^2，0.8%）等 7 类（图 2）。

2.2　分析方法

2.2.1　Sen＋Mann-Kendall 趋势分析

Sen＋Mann-Kendall 趋势分析[22]用于长时间

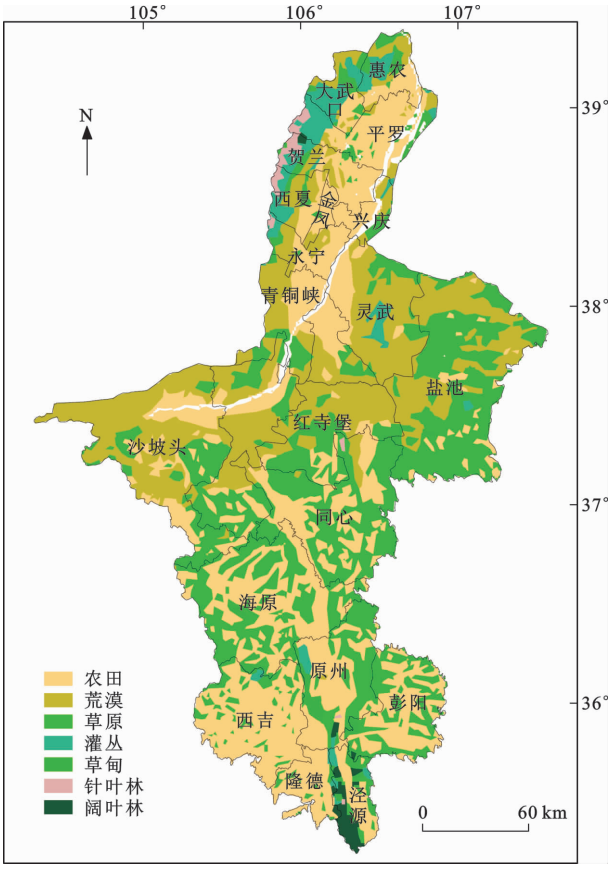


图 2 2001 年宁夏植被类型分布

Fig. 2 Distribution of Vegetation Types of Ningxia in 2001

序列的植被数据分析，可用来分析宁夏植被多年变化特征。其计算公式为

$$\beta=\mathrm{Median}\left[\frac{x_j-x_i}{j-i}\right] \qquad \forall j>i \tag{1}$$

式中：x_i、x_j 分别表示第 i 年和第 j 年的 NDVI 值；$\beta>0$ 表示时间序列呈上升趋势；$\beta<0$ 表示时间序列呈下降趋势。

Mann-Kendall 趋势分析是非参数统计检验方法。对于时间序列 x_i，$i=1,2,\cdots,n$，定义标准化检验统计量 Z 为

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S<0\end{cases} \tag{2}$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_i) \tag{3}$$

$$\mathrm{sgn}(x_j-x_i)=\begin{cases}+1 & x_j-x_i>0\\ 0 & x_j-x_i=0\\ -1 & x_j-x_i<0\end{cases} \tag{4}$$

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

式中：sgn 代表 sign 函数式；n 是植被数据序列长度；当 $n\geqslant 8$ 时，检验统计量 S 近似为正态分布，均值为 0；Var(S)为方差；Z 为标准化检验统计量，用来确定显著性；在给定显著性水平 α 下，$|Z|\geqslant 1.96$ 表示趋势通过置信度为 95%的显著性检验，$|Z|<1.96$ 表示趋势未通过置信度为 95%的显著性检验。

根据以上公式计算变化趋势并将其分为 5 个等级，分别为明显改善、轻微改善、稳定、轻微退化和严重退化(表 1)。

表 1 变化趋势分级

Table 1 Grading of Change Trends

条件	标准化检验统计量 Z	NDVI 变化趋势等级
$\beta>0$	$\geqslant 1.96$	明显改善
	$-1.96\sim 1.96$	轻微改善
$\beta=0$	$-1.96\sim 1.96$	稳定
$\beta<0$	$-1.96\sim 1.96$	轻微退化
	<-1.96	严重退化

2.2.2 偏相关分析

相关分析是指用一个指标表明不同因子之间的密切程度。研究 3 个或者 3 个以上变量的关系，实际中一个变量的变化受到多个变量综合影响[23]。为明确气候因子对 NDVI 影响的地理差异，基于像元对 1998～2019 年春季、夏季、秋季、全年 NDVI 与温度、降水量之间进行 Pearson 偏相关分析，在剔除其他气候因子的影响下，探索 NDVI 与单一气候因子之间的联系。计算公式为

$$r_{(xy,z)}=\frac{r_{xy}-r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \tag{6}$$

式中：$r_{(xy,z)}$ 为固定变量 z 之后，因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数；r_{xy} 为变量 x 与变量 y 之间的相关系数；r_{xz} 为变量 x 与变量 z 之间的相关系数；r_{yz} 为变量 y 与变量 z 之间的相关系数。

偏相关分析是指当两个变量同时受其他因素影响时，剔除其他影响因素，只考虑两个变量之间的关系。计算公式为

$$r_{XY}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[(X_i-\overline{X})(Y_i-\overline{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\overline{Y})^2}} \tag{7}$$

式中：r_{XY} 为两因子之间的相关系数；X_i 和 Y_i 分别是第 i 年的 NDVI 值和气候因子；$\overline{X}$ 和 $\overline{Y}$ 分别为 1998～2019 年 NDVI 和气候因子的平均值。

采用 Pearson 相关系数的 t 检验进行偏相关系数的显著性检验。计算公式为

$$t=\frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2_{(xy,z)}}} \tag{8}$$

式中：统计量 t 服从自由度为 $n-2$ 的 t 分布。

2.2.3　冗余分析方差分解

方差分解多用来分析不同类别的两组或两组以上解释变量共同解释一组响应变量。总方差被划分为约束和非约束两部分，约束部分表示响应变量的总方差能被解释变量解释的部分[24-25]。本研究中方差分解是指 NDVI 与环境因子（经度、纬度、海拔、坡度、坡向、温度、降水量）的多元回归分析，用来定量描述环境因子对 NDVI 的单独解释能力及各环境因子对 NDVI 的共同影响程度。使用 R 语言的 vegan 软件包对环境变量数据进行排序分析，以生成不同环境因子对 NDVI 影响的直观定量描述，以此确定不同环境变量组对 NDVI 的影响程度，以及各单因素的影响程度。

3　结果分析

3.1　NDVI 时间变化特征

从年际来看，1998～2019 年宁夏 NDVI 为 0.29～0.49[图 3(h)]，呈波动上升趋势，增长速率为 0.007 1 年$^{-1}$($p<0.001$)。不同植被类型 NDVI 均呈现增长趋势，但增长速率不同[图 3(a)～(g)]。其中，草甸 NDVI 年增长速率最高，为 0.009 5 年$^{-1}$($p<0.001$)；针叶林 NDVI 年增长速率最低，为 0.005 0 年$^{-1}$($p<0.001$)。其他植被类型按照年增长速率从大到小依次为农田、草原、阔叶林、荒漠、灌丛，对应年增长速率分别为 0.008 4、0.007 1、0.006 9、0.005 6、0.005 2 年$^{-1}$。

从季节来看，针叶林、灌丛、荒漠 NDVI 的增长速率在夏季（6 月至 8 月）最高，分别为 0.005 0 年$^{-1}$($p<0.001$)、0.004 9 年$^{-1}$($p<0.001$)、0.005 9 年$^{-1}$($p<0.001$)。阔叶林、农田、草原、草甸 NDVI 的增长速率在秋季（9 月至 11 月）最高，分别为 0.008 0 年$^{-1}$($p<0.001$)、0.009 7 年$^{-1}$($p<0.001$)、0.007 4 年$^{-1}$($p<0.001$)、0.010 7 年$^{-1}$($p<0.001$)。而在春季（3 月至 5 月），不同植被类型 NDVI 的增长速率都最缓慢。

3.2　NDVI 空间变化特征

1998～2019 年，宁夏 93.4%的区域植被覆盖呈改善趋势，其中 74.6%的区域 NDVI 明显改善。宁夏 NDVI 空间变化趋势在不同季节呈现一定差异（图 4）。春季植被显著改善的面积仅占宁夏总面积的49.8%，远低于夏季（73.6%）和秋季（71.3%）。春季植被退化面积达 16.6%，高于夏季（3.5%）和秋季（4.8%），主要分布在植被类型以农田为主的北部引黄灌区。

从植被类型来看，全年内农田 NDVI 改善的面积最大，其占宁夏总面积的 32.3%；其次为草原和荒漠，其改善的面积分别占宁夏总面积的31.1%和23.9%；针叶林 NDVI 改善的面积最小，仅占宁夏总面积的 0.4%（表 2）。不同季节内 NDVI 改善面积最大的植被类型均为农田、荒漠、草原，但不同季节内NDVI改善程度有所差异：春季草原NDVI改

表 2　1998～2019 年不同季节内植被类型变化趋势发生的面积及比例

Table 2　Areas and Proportions of Vegetation Type Change Trend in Different Seasons from 1998 to 2019

时段	变化状态	阔叶林		针叶林		农田		灌丛		荒漠		草原		草甸	
		变化面积/km²	变化比例	变化面积/km²	变化比例	变化面积/km²	变化比例	变化面积/km²	变化比例	变化面积/km²	变化比例	变化面积/km²	变化比例	变化面积/km²	变化比例
春季	改善	489.8	0.70%	370.7	0.60%	14 933.1	22.50%	1 861.8	2.80%	12 114.5	18.30%	19 098.7	28.80%	891.1	1.30%
	稳定	4.2	0.00%	8.3	0.00%	1 374.0	2.10%	226.5	0.30%	2 532.3	3.80%	1 534.3	2.30%	18.3	0.00%
	退化	16.4	0.00%	8.3	0.00%	7 418.9	11.20%	220.1	0.30%	2 314.5	3.50%	928.8	1.40%	35.5	0.10%
夏季	改善	509.9	0.80%	352.0	0.50%	22 057.7	33.30%	1 982.3	3.00%	16 057.4	24.20%	21 035.1	31.70%	922.0	1.40%
	稳定	1.9	0.00%	15.2	0.00%	267.2	0.40%	158.4	0.20%	432.4	0.70%	317.3	0.50%	0.0	0.00%
	退化	1.6	0.00%	18.6	0.00%	1 402.6	2.10%	164.1	0.20%	465.0	0.70%	216.0	0.30%	22.2	0.00%
秋季	改善	498.8	0.80%	304.2	0.50%	21 951.4	33.10%	1 794.6	2.60%	15 071.6	22.50%	20 620.7	31.10%	922.8	1.40%
	稳定	2.0	0.00%	40.2	0.10%	367.5	0.60%	207.9	0.30%	899.4	1.40%	555.6	0.80%	1.8	0.00%
	退化	11.7	0.00%	40.3	0.10%	1 410.4	2.10%	303.2	0.50%	984.2	1.50%	392.0	0.60%	19.7	0.00%
全年	改善	476.0	0.70%	276.0	0.40%	21 449.5	32.30%	1 822.6	2.70%	15 845.0	23.80%	20 763.9	31.30%	919.4	1.40%
	稳定	27.3	0.00%	43.4	0.10%	467.0	0.70%	188.8	0.30%	649.2	1.00%	500.5	0.80%	2.0	0.00%
	退化	8.9	0.00%	49.2	0.10%	1 834.3	2.80%	285.5	0.40%	440.0	0.70%	328.7	0.50%	22.6	0.00%

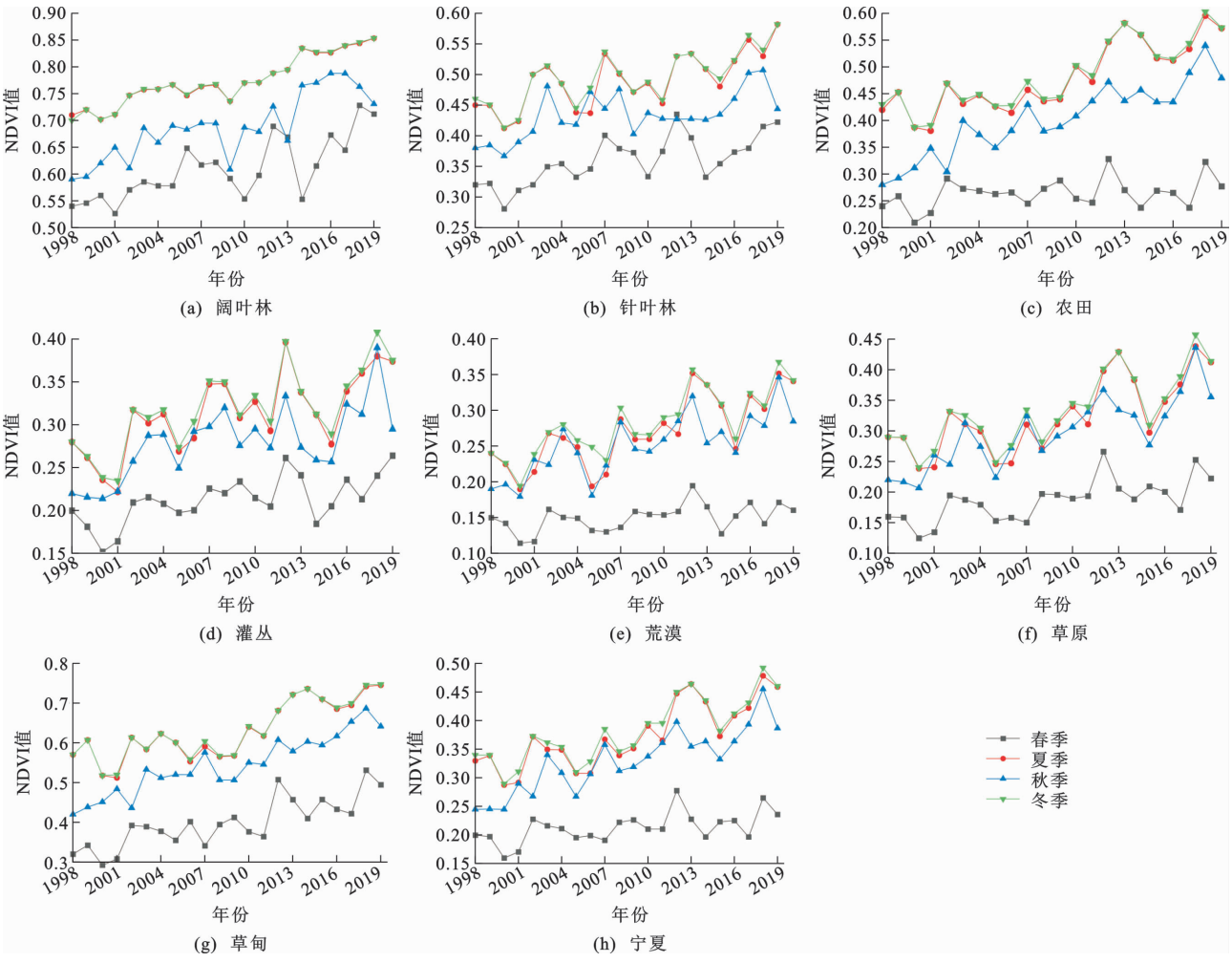


图 3 不同植被类型 NDVI 全年及各季节变化特征

Fig. 3 Annual and Seasonal Change Characteristics of NDVI of Different Vegetation Types

善的面积最大，为 19 098.7 km^2（占宁夏总面积的 28.8%），夏季和秋季农田 NDVI 改善面积最大，分别为22 057.7 km^2（33.3%）、21 951.4 km^2（33.1%）；而针叶林 NDVI 在春季、夏季、秋季 3 个季节内改善的面积均最小，分别为370.7 km^2（0.6%）、352.0 km^2（0.5%）、304.2 km^2（0.5%）。

3.3 气候因子与 NDVI 之间的相关性

为进一步揭示气候因子对植被变化的影响，本文分析了 1998～2019 年的宁夏 NDVI 与气候变化之间的关系（表 3）。温度、降水量与 NDVI 有显著相关性，并且 NDVI 与降水量的相关性高于与温度的相关性。从季节来看，春季 NDVI 与降水量、温度的正相关性最强（NDVI 与降水量的相关系数 $R_{NDVI\text{-}P}=0.574$，NDVI 与温度的相关系数 $R_{NDVI\text{-}T}=0.383$），其次为秋季（$R_{NDVI\text{-}P}=0.384$，$R_{NDVI\text{-}T}=0.172$），夏季 NDVI 仅与降水量显著相关（$R_{NDVI\text{-}T}=0.170$）。

从空间来看，全年NDVI与温度之间以正相关关系为主，占宁夏总面积的 65.7%，主要分布在以农田和草原为主的地区；全年NDVI与温度显著负相关的面积占比为 4.8%，主要分布在以荒漠为主的宁夏北部石嘴山市惠农区和大武口区。春季NDVI与温度相关性的空间分布与全年总体相似，其中显著正相关的面积占比为 64.1%，显著负相关的面积占比为 4.5%。大部分地区夏季和秋季 NDVI 与温度不相关，其面积占比分别为 56.9% 和 63.2%，主要分布在以农田、荒漠和草地为主的地

表 3 1998～2019 年春季、夏季、秋季和全年 NDVI 与温度、降水量的相关性

Table 3 Correlation of NDVI with Temperature and Precipitation During Spring, Summer, Autumn and Annual from 1998 to 2019

时段	春季	夏季	秋季	全年
$R_{NDVI\text{-}T}$	0.383***	−0.013	0.172***	0.144***
$R_{NDVI\text{-}P}$	0.574***	0.170***	0.384***	0.311***

注：***表示在 0.000 1 显著性水平下相关。

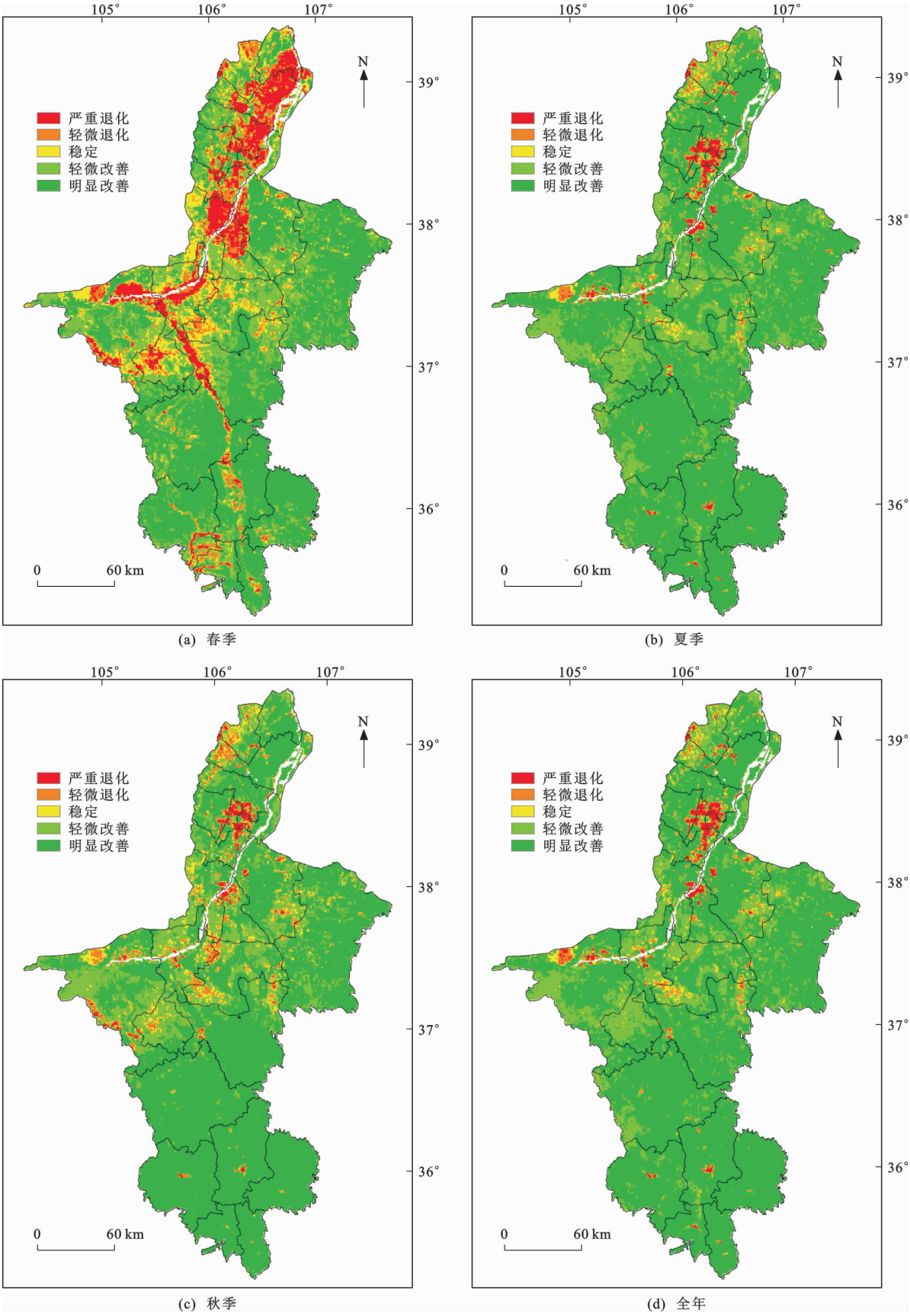


图 4　1998～2019 年不同季节 NDVI 变化趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial Distributions of NDVI Change Trends in Different Seasons from 1998 to 2019

区；其次为负相关关系，其面积占比分别为13.5%、28.6%，主要分布在以荒漠为主的沙坡头、中宁县、青铜峡市、吴忠市红寺堡区和灵武市等地区(图 5)。

不同季节降水量与 NDVI 之间均以正相关关系为主，但其相关性在空间上呈现一定差异。不同季节按照正相关的面积由大到小依次为全年(面积占比为 91.7%)、春季(82.7%)、夏季(81.8%)、秋季(48.1%)(图 6)。全年 41.1%的像元 NDVI 与降水量成极显著正相关关系，分布在以荒漠和草原为主的沙坡头及以农田和草原为主的海原县、固原市原州区和西吉县。春季 NDVI 与降水量成极显著正相关关系(面积占比为 17.9%)，分布在以农田和草地为主的吴忠市红寺堡区、同心县和海原县。夏季 NDVI 与降水量成显著正相关关系(面积占比为 25.5%)，集中在以荒漠和草地为主的宁夏西部和中南部地区。秋季 NDVI 与降水量不相关的区域面积占比 47.2%，分布在以荒漠和农田为主的地区；显著负相关区域面积占比 4.7%，主要分布在北部以森林为主的贺兰山区。

3.4 NDVI 影响因子的定量特征

地理因子(经度、纬度)、地形因子(高程、坡度、坡向)和气候因子(温度、降水量)等环境变量对 NDVI 的解释能力如图 7 所示。总体而言，环境变量对草甸 NDVI 的解释能力达到 57.8%，对其余 6 种植被类型 NDVI 的解释能力为 10.1%～27.1%。除针叶林外，气候因子对各植被类型 NDVI 的独立解释能力最高，由大到小依次为草甸(独立解释能力为51.8%)、阔叶林(21.0%)、农田(18.8%)、草原(11.1%)、灌丛(8.8%)、荒漠(7.3%)；地形因子对针叶林的独立解释能力最高，为 12.2%，对草甸无独立解释能力；地理因子对草甸的独立解释能力最高，为 2.8%，但对阔叶林无独立解释能力。

不同环境变量对植被有共同解释作用，气候与地理因子、气候与地形因子、地理与地形因子对针叶林的共同解释能力最高，分别是 1.8%、3.0%、2.8%。3 种环境变量对草甸的共同解释力最高，为 1.6%。在所有环境变量中，气候因子对不同植被类型 NDVI 变化的影响占主导地位。

4 讨 论

4.1 不同植被类型 NDVI 变化的差异

不同植被类型下 NDVI 变化存在明显差异。草甸 NDVI 年增长速率最大，为 0.009 5 年$^{-1}$。这是由于草甸的形成和演替多生长在河漫滩，近年来政府对黄河湿地保护的加强使得黄河流域宁夏段地表水面积增加，2000～2018 年宁夏水域面积共增加 100.5 km^2，河漫滩得到充足的水分和沉积物，给草甸的生长发育提供了有力的生态条件[26]。农田 NDVI 年增长速率仅次于草甸，为 0.008 4 年$^{-1}$。虽然宁夏自 2003 年实施退耕还林还草工程以来，一部分农田转为林地和草地，已完成退耕还林还草 1 346 km^2[27]，但是研究期间滩涂地和荒地被开垦为农田，现代高效农业工程在农作物生长中起到促进作用，从而提高了农田 NDVI 的增长速率[28]。农田 NDVI 在时间上呈增长趋势，但农田的面积在一定程度上有所减少，研究期间农田面积减少 753 km^2，这与 Xu 等的研究结果[29]相一致。除退耕面积以外，随着城市扩张和城市化进程的加快，城市周边耕地会优先纳为城市规划中的建设用地[30]，以支持城市基础设施建设，推动城市发展。

针叶林和灌丛的 NDVI 年增长速率相似，但在研究期间 NDVI 退化面积占自身面积比例较大，分别达到 49.2 km^2(占比为 13.4%)、285.5 km^2(12.4%)，针叶林、灌丛退化区域主要分布在贺兰山中部地区。随着旅游业的发展，贺兰山中部文化景观兴起，受人类活动影响以及生态环境脆弱导致部分区域 NDVI 呈现一定程度的退化[31]。在不同植被类型 NDVI 变化趋势(图 3)中，灌丛、荒漠、草原、草甸 NDVI 全年变化趋势与宁夏 NDVI 变化趋势相一致，面积占宁夏总面积的 57.7%，说明这些植被是影响宁夏 NDVI 变化的主要植被类型。因此，宁夏在未来植被建设中应该以林草恢复和沙漠治理为主。

总的来说，春季植被退化面积最大，主要表现在农田、灌丛和荒漠植被退化。春小麦生长周期为每年 3 月至 7 月，属于单季农作物。为了更好地利用现有气候资源，增强土地产出能力，实现农户增收，政府根据农村发展的实际需要对种植农作物种类进行必要的调整，使用冬小麦逐步代替春小麦，发展“一年两熟”复种模式以符合灌区光热资源特征和农业生产需求[32]。而在干旱半干旱地区，春季植被退化可能会导致扬尘天气的发生频率增加[33]，进而造成土壤退化和空气污染。夏季和秋季植被的退化面积及其空间分布都相似，主要由于建设用地的增加导致植被退化。在未来植被建设中需要综合考虑不同季节的植被覆盖，尤其是春季地表植被覆盖。

4.2 NDVI 变化的主要驱动因子

地形变化导致气候和生物梯度发生变化，高程、

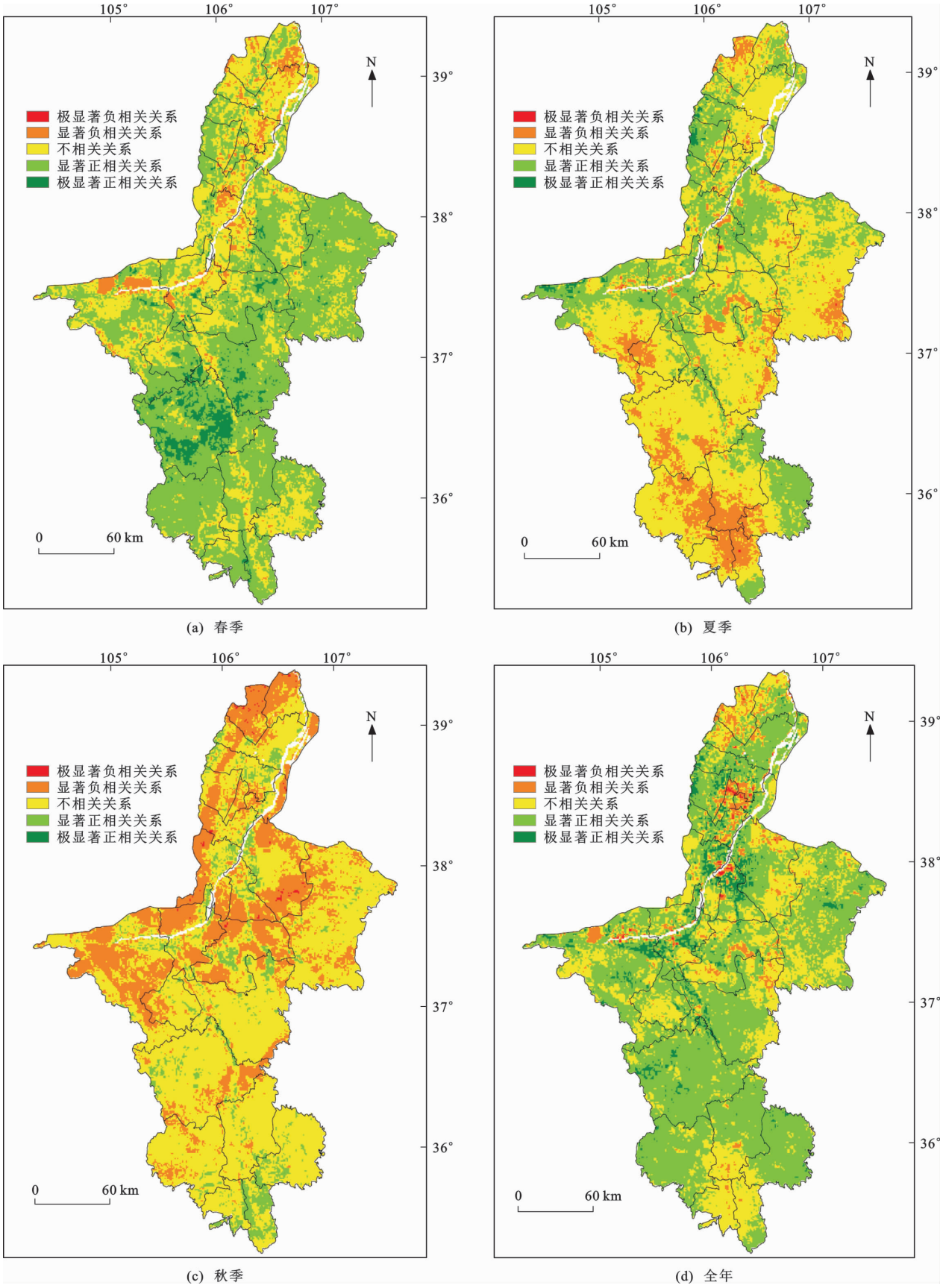


图 5　1998～2019 年 NDVI 与温度的相关性空间分布

Fig. 5　Spatial Distributions of Correlation Between NDVI and Temperature from 1998 to 2019

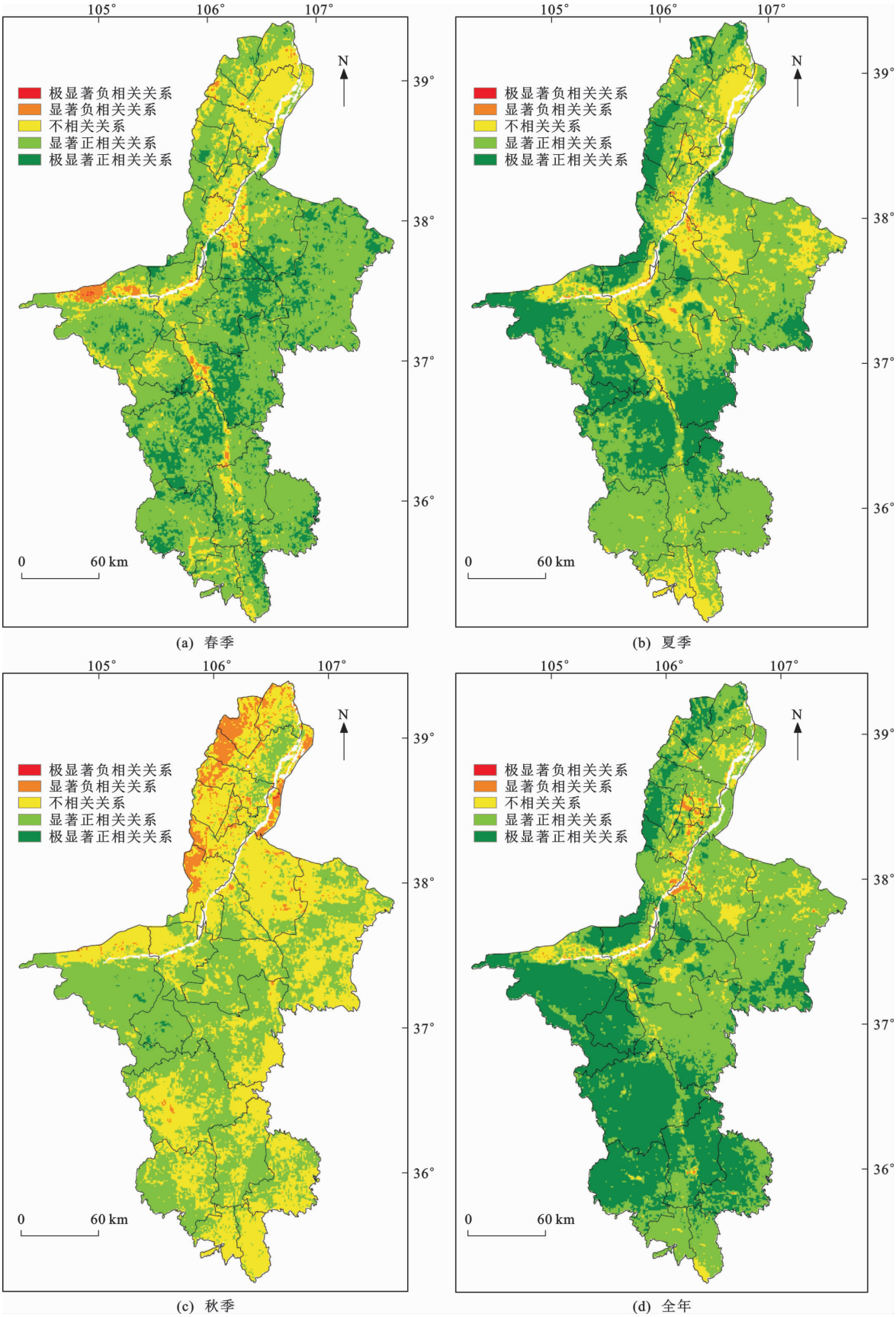
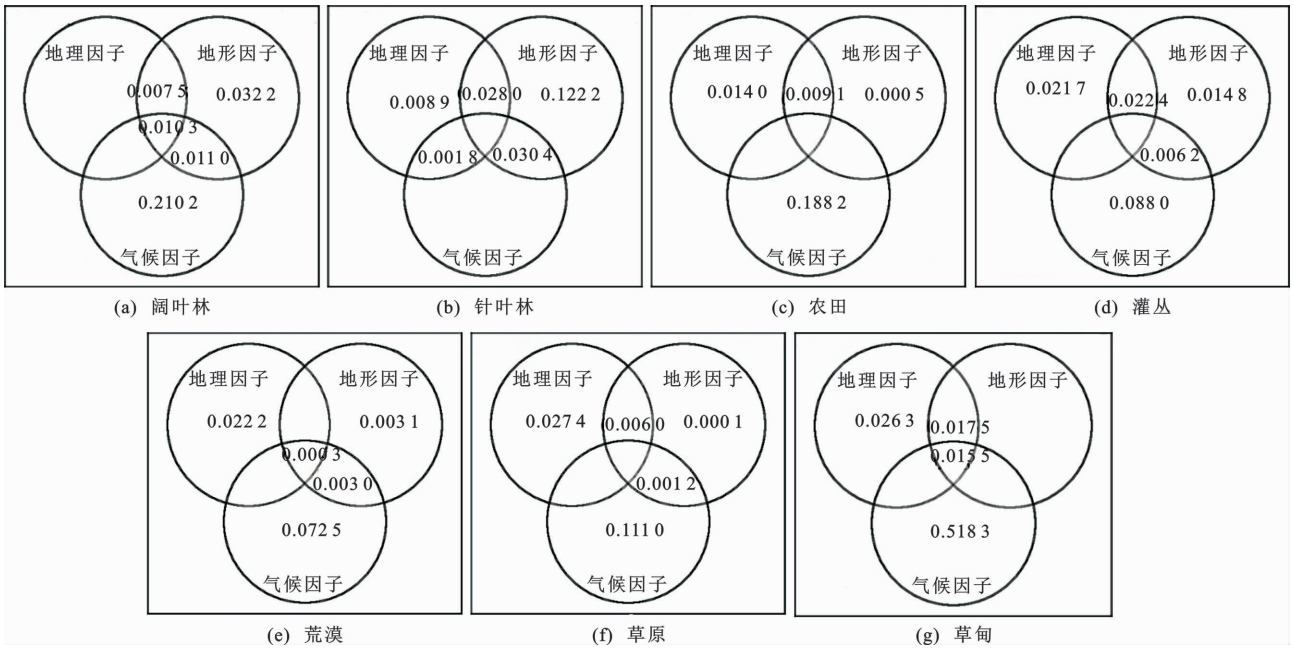


图 6 1998～2019 年 NDVI 与降水量之间的相关性空间分布

Fig. 6 Spatial Distributions of Correlation Between NDVI and Precipitation from 1998 to 2019



图中未重叠区域的数字分别表示地理因子、地形因子和气候因子对 NDVI 的解释能力；重叠区域的数字表示两个因素或者三个因素的共同解释能力；数字越大表示解释能力越高

图 7　环境变量对不同植被类型 NDVI 的影响

Fig. 7　Effects of Environmental Variables on NDVI of Different Vegetation Types

坡度和坡向会影响区域小气候，进而影响植被大尺度空间格局和分布。气候、地形和地理 3 个因子对 NDVI 有独立影响，故而不同因子变量单独进行变量选择非常重要。将 3 个因子组成环境变量进行方差分解，发现影响宁夏 NDVI 变化的主要驱动因子为气候因子。气候变化对植被生态系统既有正面影响，也有负面影响，这取决于气候条件及其变化趋势[34-35]。

由趋势分析及方差分解得到不同植被类型下温度和降水量对其的解释能力与变化趋势（表 4）。研究期间宁夏温度和降水量均呈波动上升趋势，降水量对阔叶林、草原和草甸的解释能力较高，与 NDVI 影响因子的定量分析结果相一致，由此可以推测在温度一定的情况下，降水量的增加对该类植被生长起促进作用。灌丛的生长主要受温度影响，当达到最适温度时，灌丛 NDVI 呈不断增长趋势；农田 NDVI 由于其特殊性，受温度和降水量的共同影响。

此外，不同植被类型 NDVI 变化在季节上存在差异，这种差异主要体现在不同季节温度和降水量的分异[36]，从而导致在不同季节内 NDVI 变化不同。Kong 等研究认为，春季 NDVI 与温度成正相关关系，一些植被对春季温度变化异常敏感，在降水量较低的条件下，荒漠和草原植被覆盖度增加，说明热量是影响春季植被生长的主要因素[37]。夏季

表 4　不同植被类型下温度和降水量的变化趋势及解释能力

Table 4　Change Trends and Explanation Ability of Temperature and Precipitation Under Different Vegetation Types

植被类型	温度		降水量	
	解释能力	变化趋势	解释能力	变化趋势
阔叶林	15.2%	不显著增加	48.3%	不显著增加
针叶林	0.4%	不显著增加		不显著增加
农田	6.5%	显著增加	10.6%	显著增加
灌丛	32.4%	不显著增加	3.4%	显著增加
荒漠	1.1%	显著增加	1.6%	不显著增加
草原	1.7%	显著增加	49.1%	不显著增加
草甸	0.6%	显著增加	59.5%	显著增加

NDVI 与温度成负相关关系，这一结果与 Chen 等的研究结果[38]相一致。尽管这一结果在统计学上并不显著，但对于干旱半干旱地区的大部分植被类型来说，NDVI 生长主要取决于降水量，降水量的增加提高了土壤含水量，一定程度上促进植被生长[39]。夏季温度和降水量均为年内最高值，植被生长最为茂盛，由于植被的生长存在一定的时滞和累积效应，使得夏季植被增长速率小于秋季[40]。这种效应随气候因子和植被类型的变化而变化，并通过生理过程和非气候条件的干扰而产生[41]。降水量对植被的时滞和累积效应体现在降水发生过程和植物根系对水分的有效利用，而温度对植被的时滞和累积效

应与有机物分解、氮沉降、土壤养分等有关[42]。秋季 NDVI 与温度、降水量成正相关关系，植被活动的增强更多受降水量增加的影响，在一定程度上削弱了温度降低对植被活动的抑制作用[43]。

最后，本研究考虑包括气候因子在内的环境变量并不能完全解释宁夏植被变化特征，无法被气候因子解释的部分可以归因于其他环境因素，如人类活动和自然干扰等。一方面，人类活动对 NDVI 变化具有双重作用，在城市附近，人为干扰对植被破坏程度逐渐增强，而人类对土地管理方式的改变在一定程度上提高了土地生态系统功能，进而影响植被变化[44]；另一方面，自然界中的其他植物、动物、微生物及小环境与植被在空间上密不可分[45]。因此，后续有必要进一步从更细致的角度深入研究不同植被类型变化，针对不同时期植被类型做出相应的保护措施。

5 结 语

(1)1998～2019 年宁夏 NDVI 整体呈增加趋势，年增长速率为 0.007 1 年$^{-1}$。夏季降水量占全年总降水量的 55.2%，需水量较高的针叶林、灌丛、荒漠植物在夏季增长速率最高；由于植被对气候的时滞效应，阔叶林、农田、草原、草甸在秋季增长速率最高。

(2)在年际尺度上，宁夏 93.4%的区域植被覆盖度呈改善趋势，但由于城市发展对建设用地的需求增加，银川市及周边植被出现退化趋势；1998～2019 年，春季温度不断升高而降水量变化微小，使得春季蒸发量加大，春季植被退化最为严重，发生退化的植被类型主要是对水分较为敏感的农田、荒漠和灌丛。

(3)宁夏 NDVI 与全年及各季节降水量均成正相关关系，与春季、秋季和全年温度成正相关关系，由于夏季温度过高，植物呼吸作用增强，光合作用减弱，所以 NDVI 与夏季温度成负相关关系。不同植被类型下 NDVI 与降水量主要成正相关关系，农田和草原 NDVI 在春季和全年与温度为正相关关系，而在夏季和秋季，农田 NDVI 与温度无相关性。

参 考 文 献：

References：

[1] LI P, WANG J, LIU M M, et al. Spatio-temporal Variation Characteristics of NDVI and Its Response to Climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015[J]. Catena, 2021, 203: 105331.

[2] BHATT U S, WALKER D A, RAYNOLDS M K, et al. Recent Declines in Warming and Vegetation Greening Trends over Pan-Arctic Tundra[J]. Remote Sensing, 2013, 5(9): 4229-4254.

[3] 田智慧，任祖光，魏海涛. 2000～2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. 环境科学，2022，43(2)：743-751.
TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao. Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 743-751.

[4] 覃巧婷，陈建军，杨艳萍，等. 黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J]. 中国环境科学，2021，41(8)：3832-3841.
QIN Qiao-ting, CHEN Jian-jun, YANG Yan-ping, et al. Spatiotemporal Variations of Vegetation and Its Response to Topography and Climate in the Source Region of the Yellow River[J]. China Environmental Science, 2021, 41(8): 3832-3841.

[5] GAO J B, JIAO K W, WU S H. Investigating the Spatially Heterogeneous Relationships Between Climate Factors and NDVI in China During 1982 to 2013[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(10): 1597-1609.

[6] JIANG L G, LIU Y, WU S, et al. Analyzing Ecological Environment Change and Associated Driving Factors in China Based on NDVI Time Series Data[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107933.

[7] 马晓妮，任宗萍，谢梦瑶，等. 砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析：基于地理探测器[J]. 生态学报，2022，42(8)：3389-3399.
MA Xiao-ni, REN Zong-ping, XIE Meng-yao, et al. Quantitative Analysis of Environmental Driving Factors of Vegetation Coverage in the Pisha Sandstone Area Based on Geodetector[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3389-3399.

[8] 颜 明，贺 莉，王随继，等. 基于 NDVI 的 1982～2012 年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J]. 中国水土保持科学，2018，16(3)：86-94.
YAN Ming, HE Li, WANG Sui-ji, et al. Changing Trends of NDVI in the Yellow River Basin from 1982 to 2012 at Different Temporal Scales[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(3): 86-94.

[9] KARNIELI A, OHANA-LEVI N, SILVER M, et al. Spatial and Seasonal Patterns in Vegetation Growth-limiting Factors over Europe[J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2406.

[10] JIA L, LI Z B, XU G C, et al. Dynamic Change of Ve-

getation and Its Response to Climate and Topographic Factors in the Xijiang River Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11): 11637-11648.

[11] YANG L Q, GUAN Q Y, LIN J K, et al. Evolution of NDVI Secular Trends and Responses to Climate Change: A Perspective from Nonlinearity and Nonstationarity Characteristics[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 254: 112247.

[12] LIU C L, LI W L, WANG W Y, et al. Quantitative Spatial Analysis of Vegetation Dynamics and Potential Driving Factors in a Typical Alpine Region on the Northeastern Tibetan Plateau Using the Google Earth Engine[J]. Catena, 2021, 206: 105500.

[13] CHENG M, JIN J X, ZHANG J M, et al. Effect of Climate Change on Vegetation Phenology of Different Land-cover Types on the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(2): 470-487.

[14] GIRARDIN M P, HOGG E H, BERNIER P Y, et al. Negative Impacts of High Temperatures on Growth of Black Spruce Forests Intensify with the Anticipated Climate Warming[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 627-643.

[15] SUN H, WANG X P, FAN D Y, et al. Contrasting Vegetation Response to Climate Change Between Two Monsoon Regions in Southwest China: The Roles of Climate Condition and Vegetation Height[J]. Science of the Total Environment, 2021, 802: 149643.

[16] NAEEM S, ZHANG Y Q, ZHANG X Z, et al. Both Climate and Socioeconomic Drivers Contribute to Vegetation Greening of the Loess Plateau[J]. Science Bulletin, 2021, 66(12): 1160-1163.

[17] TIAN F, LIU L Z, YANG J H, et al. Vegetation Greening in More Than 94% of the Yellow River Basin (YRB) Region in China During the 21st Century Caused Jointly by Warming and Anthropogenic Activities[J]. Ecological Indicators, 2021, 125(2): 107-479.

[18] 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.
ABLA Murat, ZHANG Xiao-ping, CHEN Li-li, et al. Spatial-temporal Distribution of Desertification on the Loess Plateau Using the GIMMS NDVl Data[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(3): 24-31.

[19] JIANG W G, YUAN L H, WANG W J, et al. Spatio-temporal Analysis of Vegetation Variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015, 51(7): 117-126.

[20] ZHANG X Y, LIU K, WANG S, et al. Spatiotemporal Evolution of Ecological Vulnerability in the Yellow River Basin Under Ecological Restoration Initiatives[J]. Ecological Indicators, 2022, 135(1/2): 108586.

[21] 杜灵通，宋乃平，王　磊，等. 近 30a 气候变暖对宁夏植被的影响[J]. 自然资源学报，2015，30(12)：2095-2106.
DU Ling-tong, SONG Nai-ping, WANG Lei, et al. Impact of Global Warming on Vegetation Activity in Ningxia Province from 1982 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(12): 2095-2106.

[22] CUI Y P, LIU J Y, HU Y F, et al. An Analysis of Temporal Evolution of NDVI in Various Vegetation-climate Regions in Inner Mongolia, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1989-1996.

[23] 李　程，庄大方，何剑锋，等. 东西伯利亚苔原—泰加林过渡带植被遥感物候时空特征及其对气温变化的响应[J]. 地理学报，2021，76(7)：1634-1648.
LI Cheng, ZHUANG Da-fang, HE Jian-feng, et al. Spatiotemporal Variations in Remote Sensing Phenology of Vegetation and Its Responses to Temperature Change of Boreal Forest in Tundra-Taiga Transitional Zone in the Eastern Siberia[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1634-1648.

[24] 李双双，延军平，万　佳. 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，2012，67(7)：960-970.
LI Shuang-shuang, YAN Jun-ping, WAN Jia. The Spatial-temporal Changes of Vegetation Restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia Region[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 960-970.

[25] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco5 介绍[J]. 生物多样性，2013，21(6)：765-768.
LAI Jiang-shan. Canoco5: A New Version of an Ecological Multivariate Data Ordination Program[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(6): 765-768.

[26] 张世雄，杨晓艳，温　静，等. 山西吕梁山亚高山草甸物种多样性的时空变化格局[J]. 生态学报，2018，38(18)：6685-6693.
ZHANG Shi-xiong, YANG Xiao-yan, WEN Jing, et al. Spatial and Temporal Patterns of Species Diversity of Subalpine Meadows in the Lvliang Mountains, Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6685-6693.

[27] 尤南山，董金玮，肖　桐，等. 退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响[J]. 地理科学，2020，40(2)：315-323.

YOU Nan-shan, DONG Jin-wei, XIAO Tong, et al. The Effects of the "Grain for Green" Project on Gross Primary Productivity in the Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(2): 315-323.

[28] 安斯文. 宁夏"三生"用地时空演化的驱动机制及其生态效应研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
AN Si-wen. Driving Mechanism of Spatial-temporal Evolution of Production-living-ecological Land and Its Ecological Effects in Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.

[29] XU Y T, LI P, PAN J J, et al. Eco-environmental Effects and Spatial Heterogeneity of "Production-ecology-living" Land Use Transformation: A Case Study for Ningxia, China[J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9659.

[30] EL-HAMID H T, WEI C Y, HAFIZ M A, et al. Effects of Land Use/Land Cover and Climatic Change on the Ecosystem of North Ningxia, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 1099.

[31] 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞, 等. 西北典型生态脆弱区植被覆盖度时空变化及其生态安全评价: 以宁夏贺兰山为例[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 599-608.
LIN Yan-min, NAN Xiong-xiong, HU Zhi-rui, et al. Fractional Vegetation Cover Change and Its Evaluation of Ecological Security in the Typical Vulnerable Ecological Region of Northwest China: Helan Mountains in Ningxia[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(5): 599-608.

[32] 徐华军. 气候变化背景下宁夏冬、春小麦产量和气象灾害特征比较研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
XU Hua-jun. Comparative Study of Winter and Spring Wheat's Yield and Meteorological Disaster Characteristics in Ningxia Under the Background of Climate Change[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.

[33] ALBALADEJO J, MARTINEZ-MENA M, ROLDAN A, et al. Soil Degradation and Desertification Induced by Vegetation Removal in a Semiarid Environment [J]. Soil Use and Management, 1998, 14(1): 1-5.

[34] 程晓鑫, 何远梅, 张 岩. 黄土高原植被恢复与局地气候变化的关系[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 25-33.
CHENG Xiao-xin, HE Yuan-mei, ZHANG Yan. Correlations Between Vegetation Restoration and Regional Climate Change in the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 25-33.

[35] LIU N, DING Y X, PENG S Z. Temporal Effects of Climate on Vegetation Trigger the Response Biases of Vegetation to Human Activities[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 31: e1822.

[36] KLINGE M, DULAMSUREN C, ERASMI S, et al. Climate Effects on Vegetation Vitality at the Treeline of Boreal Forests of Mongolia[J]. Biogeosciences, 2018, 15(5): 1319-1333.

[37] KONG D D, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Seasonal Vegetation Response to Climate Change in the Northern Hemisphere(1982－2013)[J]. Global and Planetary Change, 2016, 148: 1-8.

[38] CHEN A F, HE B, WANG H L, et al. Notable Shifting in the Responses of Vegetation Activity to Climate Change in China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 87/88: 60-66.

[39] GHEBREZGABHER M G, YANG T B, YANG X M, et al. Assessment of NDVI Variations in Responses to Climate Change in the Horn of Africa[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2020, 23(3): 249-261.

[40] 张晓东, 朱文博, 张静静, 等. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 41-53.
ZHANG Xiao-dong, ZHU Wen-bo, ZHANG Jing-jing, et al. Phenology of Forest Vegetation and Its Response to Climate Change in the Funiu Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 41-53.

[41] DING Y X, LI Z, PENG S Z. Global Analysis of Time-lag and Accumulation Effects of Climate on Vegetation Growth[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 92: 102179.

[42] ZHU Z C, PIAO S L, MYNENI R B, et al. Greening of the Earth and Its Drivers[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(8): 791-795.

[43] 孔冬冬, 张 强, 黄文琳, 等. 1982～2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 39-52.
KONG Dong-dong, ZHANG Qiang, HUANG Wen-lin, et al. Vegetation Phenology Change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and Its Related Meteorological Factors[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 39-52.

[44] ZHAO M S, RUNNING S W. Drought-induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009[J]. Science, 2010, 329: 940-943.

[45] LIU Y F, LIU Y, SHI Z H, et al. Effectiveness of Revegetated Forest and Grassland on Soil Erosion Control in the Semi-arid Loess Plateau[J]. Catena, 2020, 195: 104787.