

田卫堂, 刘森, 张子元, 等. 考虑气候时滞效应的河北山区 NDVI 演变归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 962-971. TIAN W T, LIU M, ZHANG Z Y, et al. Attribution analysis of NDVI evolution in mountainous area of Hebei Province considering climate delay effect[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 962-971. (in Chinese)

# 考虑气候时滞效应的河北山区 NDVI 演变归因

田卫堂<sup>1</sup>, 刘森<sup>2</sup>, 张子元<sup>1</sup>, 张学沛<sup>1</sup>, 王庆明<sup>3</sup>

(1. 河北省水土保持工作站, 石家庄 050011; 2. 河北省水利科学研究院, 石家庄 050057;  
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:**从植被类型、植被物候、气候因子时滞效应等方面研究 2001 年以来河北山区归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)演变规律, 并将气候因子时滞效应引入多元线性回归方法中, 识别气候因子和人类活动对河北山区 NDVI 演变的贡献。结果表明: 2001—2022 年河北山区 NDVI 呈持续增长趋势, 平均增速为 0.003 7/a, 其中乔木林、灌木林和草地 3 种植被类型增速分别为 0.003 5/a、0.004 0/a 和 0.003 8/a; 受气候变化影响, 河北山区植被生长季变长, 生长季开始时间平均提前 9 d, 而生长季结束时间仅提前 1 d; 降水对植被 NDVI 的影响主要发生在当月, 而气温和潜在蒸散发对植被 NDVI 的影响存在 1 个月的滞后性, 考虑气候因子的时滞效应后, 气候变化和人类活动对河北山区 NDVI 演变的贡献分别为 39% 和 61%, 与不考虑气候因子时滞效应对比, 多元线性回归的决定系数由 0.80 提高到 0.87。人工水保措施是河北山区植被 NDVI 增长的主导因素, 对快速改善山区生态环境至关重要, 同时 2001 年以来降水、气温等气候因素也有利于植被恢复, 对植被条件较好的区域, 应以自然恢复为主, 实现自然条件下的生态平衡。研究结果对优化山区水土保持工作方案, 提高植被修复措施效果具有重要意义。

**关键词:**河北山区; NDVI; 滞后效应; 变化归因; 植被物候

**中图分类号:** TV62; TV882.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0092

2000 年以来, 河北省持续开展了水土流失综合治理工作, 通过造林种草、封育保护、修建小型水利水保设施等措施, 山区生态环境显著改善<sup>[1]</sup>, 其中最突出的表现为植被覆盖度的增加。一方面人工植被修复措施对山区林草植被覆盖度增加有不可替代的作用<sup>[2-3]</sup>, 另一方面气候变化因素的贡献也不能忽视<sup>[4-5]</sup>, 但目前尚缺乏对河北山区植被演变规律及不同因素贡献的定量分析。准确识别气候变化和人类活动的影响贡献, 对山区进一步开展合理高效的水土保持工作具有重要指导意义。

在分析植被覆盖度演变趋势方面, 通常采用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、叶面积指数(leaf area index, LAI)、植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)等遥感植被指数分析时间序列演变特征, 其中 NDVI 具有对植被

生长状态响应敏感, 遥感光谱数据获取方便等优势, 是目前应用最为广泛的植被指数<sup>[6]</sup>。已有研究通过对河北省的太行山区<sup>[7]</sup>、燕山区<sup>[8]</sup>、坝上高原区<sup>[9-10]</sup>等开展植被指数演变分析, 研究普遍认为近 20 年河北省山区植被快速恢复。但目前分析并没有区分植被类型, 如乔木林、灌木林和草地气候条件和人工植被恢复措施不同, 其演变规律也呈现不同特征<sup>[11-12]</sup>, 尚需进一步分析。另外, 近 20 年全球气候变暖, 导致植被生长季发生变化<sup>[13-15]</sup>, 物候提前导致植被生长季增加也是反映河北山区植被演变的一个重要指标, 其变化规律目前还不清楚。在植被覆盖演变归因方面, 通常认为影响植被演变的气候因子主要有降水、气温和潜在蒸散发<sup>[16-17]</sup>, 气候因子为植被生长提供水分和能量条件, 扣除气候因子, 其余通常归结为人类活动影响<sup>[18-19]</sup>。研究<sup>[20-21]</sup>表明气

收稿日期: 2023-06-25 修回日期: 2023-09-05 网络出版时间: 2023-10-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231007.1404.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204); 河北省水利科研项目(冀水科研 2022-01; 2023-72)

作者简介: 田卫堂(1973—), 男, 河北安新人, 高级工程师, 主要从事水土保持方面研究。E-mail: lltwt@sina.com

通信作者: 王庆明(1987—), 男, 河北邯郸人, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源演变解析方面研究。E-mail: wangqm@iwhr.com

候因子对植被生长影响存在滞后性,即“时滞效应”,并且研究<sup>[22-23]</sup>表明气候因子对 NDVI 的影响通常存在 0~3 月的滞后期。多元线性回归方法是建立目标变量和解释变量之间线性关系的经典统计方法<sup>[24]</sup>,常用来定量识别不同驱动因素对植被演变的贡献<sup>[25]</sup>,传统的多元线性回归方法在分析植被演变原因时,通常采用逐月对应的气候因子和植被指数,未考虑气候因子的“时滞效应”,可能会低估气候因子的贡献<sup>[26-27]</sup>,目前在河北山区还未开展相关研究。本研究在系统分析河北山区植被 NDVI 演变规律的基础上,考虑气候时滞效应建立多元线性回归模型,预期能够更准确回答 NDVI 演变原因。

## 1 研究区域及方法

### 1.1 研究区域

河北省地处华北地区东北部(图 1),36°03' N~42°40' N,113°27' E~119°50' E,全省面积 18.86 万 km<sup>2</sup>。河北省地势西高东低,自西北向东南依次排列为坝上高原、山地丘陵和平原三大地貌单元,其面积分别占全省总面积的 9.3%、51.7% 和 39%。本研究区域为坝上高原和山地丘陵两部分,统称为河北山区,其中山地丘陵又分为太行山区和燕山区。坝上高原海拔高程 1 350~1 670 m,燕山海拔高程为 50~2 116 m,太行山高程为 100~2 834 m。河北山区 1956—2016 年多年平均降水量为 512 mm,全年降水量 70%~80% 集中在 6—9 月份,总趋势由燕山、太行山迎风坡分别向西北和东南递减<sup>[28]</sup>。

### 1.2 数据来源与研究方法

#### 1.2.1 数据来源

采用 NDVI 指标反映植被演变动态,数据来自 SPOT 卫星植被传感器的 SPOT NDVI 数据集,记录时间为 2001—2022 年,时间分辨率为 10 d,空间分辨率为 1 km(<http://www.vito-eodata.be>)。国内研究对 SPOT NDVI 数据集进行了校正,以去除卫星移位和传感器退化的影响,并应用最大值复合方法生成月度和年度数据集<sup>[29]</sup>,处理后的数据集下载自中国科学院资源环境科学数据中心(RESDC; <http://www.resdc.cn>)。

降水、气温等气象数据来自中国气象局国家气象信息中心提供的逐日降水、气温、风速、相对湿度、大气压和日照时数数据(<http://data.cma.cn>)。

#### 1.2.2 研究方法

潜在蒸散发量计算。采用 Penman 公式计算潜

在蒸散发量,代表区域植被蒸散发的最大能力,综合反映气候因子变化对植被蒸散发的影响,表达式为

$$P_{ET} = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta R_n + \rho c_p D / r_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

式中:  $P_{ET}$  为植被潜在蒸散发量, mm;  $R_n$  为地表净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c_p$  为大气的定压比热, MJ/(kg·°C), 取 0.001 004 MJ/(kg·°C);  $r_a$  为空气动力学阻抗, s/m;  $D$  为水汽压与饱和水汽压之差, kPa;  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率, kPa/°C;  $\gamma$  为地表湿度计常数, kPa/°C, 取 0.066;  $\lambda$  为水的蒸发潜热, MJ/kg。

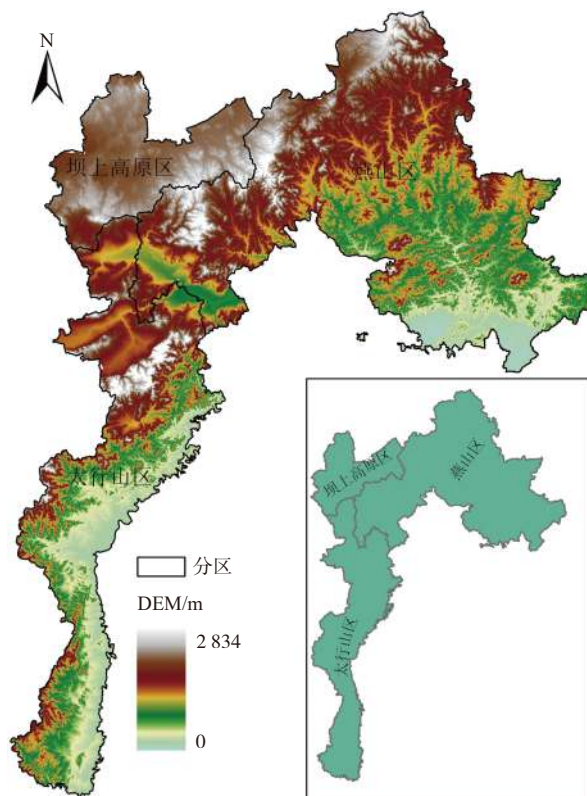


图 1 研究分区及河北山区 DEM

Fig. 1 Study zoning and DEM in mountainous area of Hebei Province

植被类型确定。植被类型数据来源于 MODIS 土地覆盖产品(MOD23Q1),分辨率为 500 m,采用国际地球生物圈计划土地分类方案,方案定义了 17 个土地覆盖类型,包括 11 个自然植被类型。根据河北省山区特点,对相似土地覆盖类型进行合并,得到乔木林、灌木林和草地三大类植被类型,并根据植被 NDVI 分辨率进行重采样,统一为 1 km 分辨率数据。

植被物候计算。植物物候指植物受气候和其他环境因子的影响而出现的以年为周期的自然现象,植被物候常用生长季开始时间(starting date of growing season, SOS)和结束时间(ending date of growing season,

EOS)表征。利用双 logistic 曲线对 NDVI 时间序列数据重建,得到全年 365 d 的逐日 NDVI 序列,表达式为

$$T_{NDVI} = c_1 + c_2 \times \left( \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_1 - t}{x_2}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_3 - t}{x_4}\right)} \right) \quad (2)$$

式中: $t$ 为生长季开始时间或结束时间; $T_{NDVI}$ 为 $t$ 时刻的 NDVI 值; $c_1$ 、 $c_2$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 和 $x_4$ 为利用最小二乘拟合方法拟合的参数。对重建后的逐日 NDVI 序列求一阶差分,求得 NDVI 上升最快点对应的日序作为生长季开始时间(SOS),NDVI 下降最快点对应的日序作为生长季结束时间(EOS)。

考虑气候滞后效应的归因方法。首先,采用皮尔逊相关系数用来研究植被 NDVI 与气候因子的相关关系,确定滞后月份,对于时间系列 $X$ 和 $Y$ ,皮尔逊相关系数为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中: $r$ 为皮尔逊相关系数; $n$ 表示时间序列的长度; $i$ 为时间序号; $X_i$ 表示时间序号为 $i$ 的 $X$ 值; $Y_i$ 表示时间序号为 $i$ 的 $Y$ 值; $\bar{X}$ 表示 $X$ 的均值; $\bar{Y}$ 表示 $Y$ 的均值。 $r$ 取值为 $-1 \sim 1$ ,当 $r < 0$ 表明时间序列之间存在负相关,当 $r > 0$ 表明时间序列之间存在正相关,且越接近 1,表明时间序列之间的相关性越强。在月尺度上,植被对气候响应的滞后时间一般在 0~3 个月内<sup>[20]</sup>,因此,分别计算植被 NDVI 与提前 0~3 个月的气候因子的相关系数,选取相关系数最大的滞后月份作为 NDVI 对气候因子响应的滞后时间。

其次,利用 Evans 等<sup>[30]</sup>提出的残差分析法,剥离气候变化和人类活动分别对植被 NDVI 变化的影响。以降水量、气温、潜在蒸散发量为自变量,植被 NDVI 为因变量,构建多元线性回归模型,表达式为

$$C_{NDVI} = aP + bT + cP_{ET} + d \quad (4)$$

$$H_{NDVI} = T_{NDVI} - C_{NDVI} \quad (5)$$

式中: $P$ 、 $T$ 和 $P_{ET}$ 分别代表时段内的降水量、气温和潜在蒸散发量; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 是多元线性回归的系数; $d$ 为多元线性回归的截距; $T_{NDVI}$ 为 $t$ 月的实际 NDVI 值; $C_{NDVI}$ 为多元线性回归模型预测的 NDVI 值,认为是气候变化对植被 NDVI 的影响; $H_{NDVI}$ 为实际 NDVI 值和多元线性回归模型预测的

NDVI 值之差,即残差,反映人类活动对植被 NDVI 的影响。

以往利用残差对植被变化进行归因分析往往只考虑了时段对应的气候因子值,本研究考虑气候对植被 NDVI 影响作用的滞后性,改进多元线性回归模型中的式(4),表达式为

$$C_{NDVI,t} = aP_{t-i} + bT_{t-j} + cP_{ET,t-k} + d \quad (6)$$

式中: $C_{NDVI,t}$ 为 $t$ 月多元线性回归模型预测的 NDVI 值; $i$ 、 $j$ 、 $k$ 分别代表降水、气温和潜在蒸散发的滞后月份; $P_{t-i}$ 、 $T_{t-j}$ 和 $P_{ET,t-k}$ 分别代 $t$ 月滞后 $i$ 、 $j$ 、 $k$ 月的降水量、气温和潜在蒸散发量; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 是多元线性回归的系数; $d$ 是多元线性回归的截距。

最后,对改进的回归模型表现进行评价,采用决定系数 $R^2$ 、均方根误差 $E_{RMS}$ 和平均绝对误差 $E_{MA}$ 进行交叉验证。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - Y_i)^2} \quad (7)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \right)} \quad (8)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (9)$$

式中: $Y_i$ 和 $\hat{Y}_i$ 分别表示实际 NDVI 序列值和预测 NDVI 序列值; $\bar{Y}_i$ 为实际序列平均值; $n$ 为样本数量。

## 2 结果分析

### 2.1 河北山区 NDVI 演变规律

#### 2.1.1 NDVI 时空演变规律

2001 年以来河北坝上高原区、燕山区和太行山区植被 NDVI 均呈现持续增长趋势,见图 2。河北山区多年平均植被 NDVI 为 0.384,2001—2022 年增长速率为 0.003 7/a,其中:燕山区多年平均植被 NDVI 最高,为 0.413,2001—2022 年增长速率为 0.003 6/a,由 2011 年的 0.368 增长到 2022 年的 0.463;太行山区多年平均植被 NDVI 为 0.358,2001—2022 年增长速率在 3 个分区中最高,为 0.004/a,NDVI 由 2001 年的 0.303 增加到 0.431;坝上高原区降水量低于另两个分区,植被以灌草类型为主,多年平均 NDVI 最低,为 0.266,2001—2022 年 NDVI 增速为 0.002 5/a,由 2001 年的 0.230 增加到 2022 年的 0.286。3 个分区时段内的变化趋势和年际间波动较为一致:在降水少的年份 NDVI 也降低,如 2009 年;在降水丰沛

的年份 NDVI 也相应增加,如 2021 年。这说明 NDVI 年际间波动变化受气象因素影响明显。

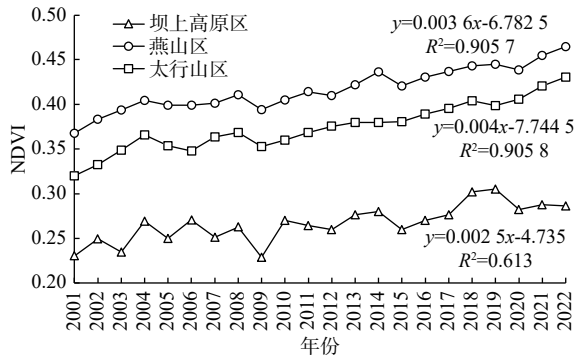


图 2 2001—2022 年各分区 NDVI 演变规律

Fig. 2 Evolution of NDVI in each region from 2001 to 2022

从 NDVI 空间分布(图 3)上看:坝上高原区 NDVI 分布较为均匀,整体低于另外两个分区;燕山区 NDVI 由西南向东北部递减,最高值为 0.68,也是河北山区植被条件最好的区域;太行山区 NDVI 分布表现为西部略高于东部区域,主要原因为东部区域靠近平原,人类活动强烈,城市、农田等土地利用类型较多,导致整体 NDVI 低于西部以自然植被为主的山区。利用 Mann-Kendall 趋势性检验方法分析 NDVI 变化的显著性(图 3),分 5 个等级,极显著增加( $p < 0.01$ )、显著增加( $p < 0.05$ )、不显著变化( $p \geq 0.05$ )、显著减少( $p < 0.05$ )和极显著减少( $p < 0.01$ )。结果显示 78% 的区域呈现出极显著增加趋势,11% 区域呈现显著增加趋势,仅有不到 2% 的区域呈现出显著减少或者极显著减少趋势,说明整个河北山区在 2001 年以后植被恢复效果显著。

### 2.1.2 不同植被类型 NDVI 演变

河北山区植被类型主要包括乔木林、灌木林和草地 3 种类型,见图 4。从 3 种植被类型上看:燕山区乔木林占燕山区总面积的 15%,灌木林和草地分别占 41% 和 24%;太行山区乔木林主要分布在西部地区,占太行山区总面积为 9%,灌木林和草地分别占 36% 和 18%;坝上高原区主要为草地,占坝上高原区总面积的 86%,仅有极少乔木林和灌木林分布。从 3 种植被类型 NDVI 概率密度分布上看:乔木林 NDVI 概率密度最高为 0.57,占比在 10.5% 左右;灌木林 NDVI 概率密度最高值为 0.45,占比约为 11%;草地 NDVI 概率密度分布表现为 2 个峰值,一个峰值在 0.27,占比为 5.3%,另一个峰值在 0.41,占比约为 4.2%。草地出现两个峰值的原因可能是分布在坝上高原的草地 NDVI 较低,而分布在燕山区和太行山区的草地 NDVI 较高,导致出现两个峰值。

3 种植被类型的 NDVI 在 2001—2022 年时段

均呈现增长趋势,见图 5。乔木林、灌木林和草地增长速率分别为 0.003 5、0.004 0 和 0.003 8/a,说明不同类型植被均有恢复。

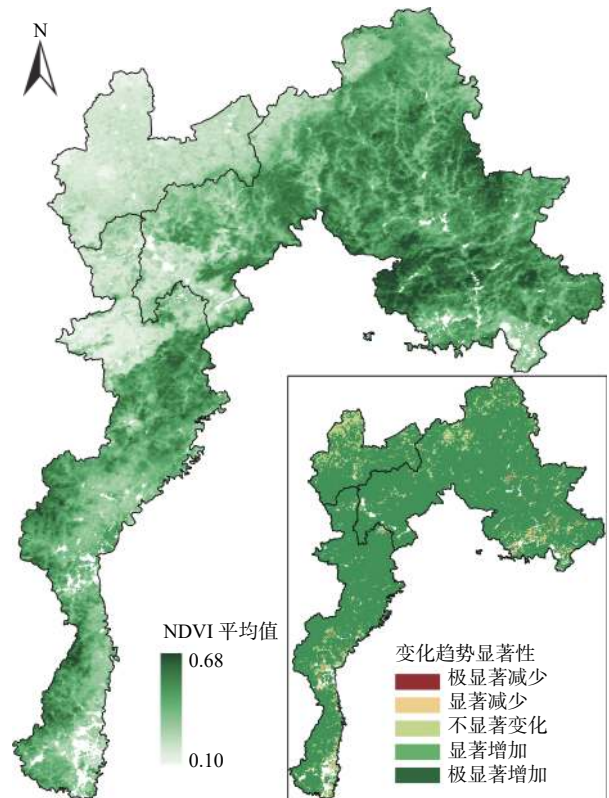


图 3 2001—2022 年 NDVI 均值及变化趋势

Fig. 3 The mean value and changing trend of NDVI from 2001 to 2022

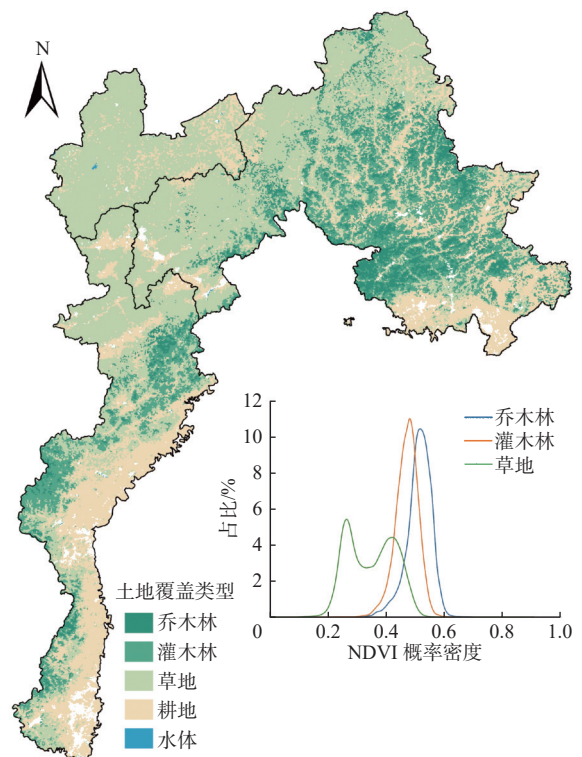


图 4 土地覆盖类型及不同类型植被 NDVI 概率密度分布

Fig. 4 Land cover type and NDVI distribution density of different types of vegetation

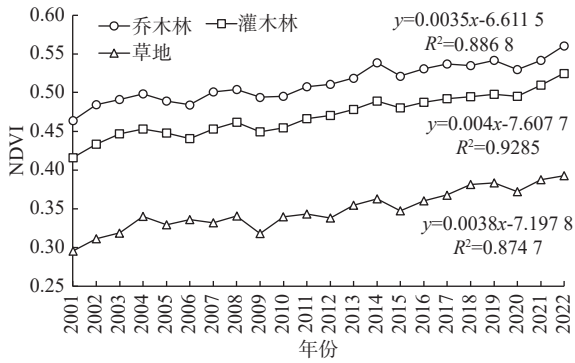


图 5 2001—2022 年不同类型植被 NDVI 变化趋势  
Fig. 5 Variation trend of NDVI of different types of vegetation from 2001 to 2022

### 2.1.3 植被物候演变规律

植被物候通常能够反映植被生理过程对环境变

化的响应,但植被物候变化相对缓慢,相近年份的对比难以反映物候的趋势性变化,另外,为消除单一年份气候异常的影响,以 2001—2005 年(5 年平均)植被物候作为基准期,以 2018—2022 年植被物候作为对比期,如图 6 所示,基准期河北山区植被生长季开始时间(SOS)为第 143 d,对比期生长季开始时间为第 134 d,较基准期提前了 9 d,而生长季结束时间(EOS),在基准期和对对比期未出现显著差异,对比期 EOS 较基准期提前 1 d,故河北山区整个生长季平均增加了 8 d。对比期较基准期坝上高原、燕山区和太行山区 SOS 分别提前了 6、11 和 8 d, EOS 分别提前了 2、1 和 1 d,意味着整个生长季分别增加了 4、10 和 7 d。

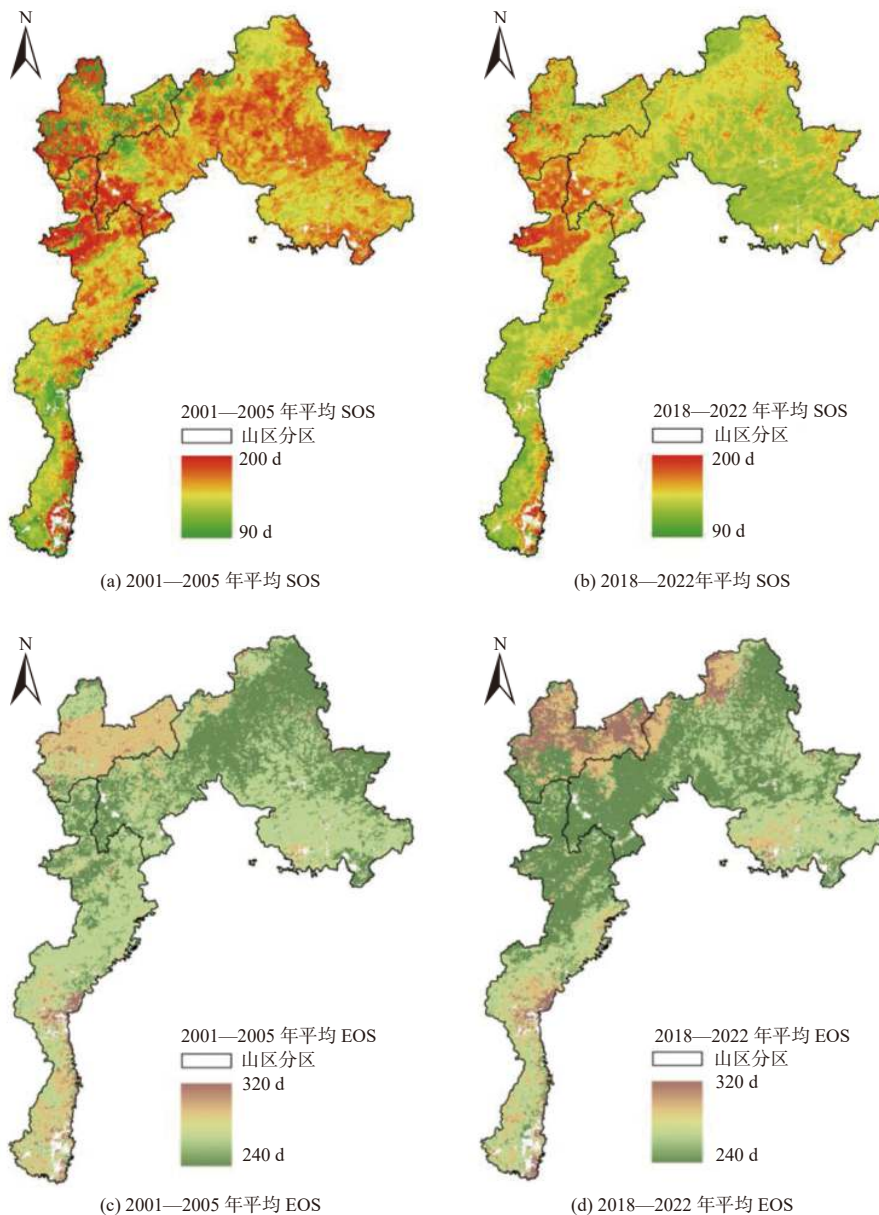


图 6 河北山区植被物候基准期和对对比期 SOS 和 EOS  
Fig. 6 SOS and EOS, the reference period and correlation period of vegetation phenology in mountainous areas of Hebei Province

## 2.2 气候因子影响规律及滞后时间

### 2.2.1 气候因子对植被 NDVI 影响规律

年尺度不同梯度等级降水量、气温和潜在蒸散发量与植被 NDVI 变化关系见图 7。年降水量小于 600 mm 左右时,随降水增加,植被 NDVI 增长速率较快,年降水量超过 600 mm 以后植被 NDVI 变化明显放缓,不再增长,说明在海河流域山区降水量增加到一定程度时,水分不再是限制条件,光热条件(气温、太阳辐射)成为主要限制条件。如图 7(b)所示,整体上植被 NDVI 与年均气温在空间上呈正相关关系,气温的增加促使了植被增长,尽管如此,年均温度高于 13 °C 时,植被 NDVI 随气温升高有所下降,这时气温过高,植被生长受到抑制。年均气温在 8 °C 左右存在一个 NDVI 的低极值区,原因可能是年均气温低于 8 °C 的区域主要分布在北部

海拔较高的坝上地区,植被类型以草地为主,已经适应寒冷的气候,在低温区间仍存在 NDVI 的波峰分布。年均气温在 8 °C 以上,主要为中部和北部的燕山、太行山区域,植被类型以乔木林、灌木林为主,年均气温在 8 °C 左右时,植被生长受限,存在一个 NDVI 低极值区。图 7(c)为植被 NDVI 和潜在蒸散发量的空间关系,年潜在蒸散发量与年植被 NDVI 在空间上呈马鞍状分布关系,潜在蒸散发量低于 1 000 mm/a 时,植被 NDVI 随潜在蒸散发量增加而增加,潜在蒸散发量高于 1 300 mm/a 时,植被 NDVI 随潜在蒸散发量增加而减小,可能原因是潜在蒸散发量较低时,区域土壤水分供给相对充足,能量供给增加,植被光合作用加速促进生长,但潜在蒸散发量较高时,区域辐射强烈,土壤水分供给不足,植被更易受水分胁迫,能量供给越高,植被受干旱胁迫越严重,不利于植被生长。

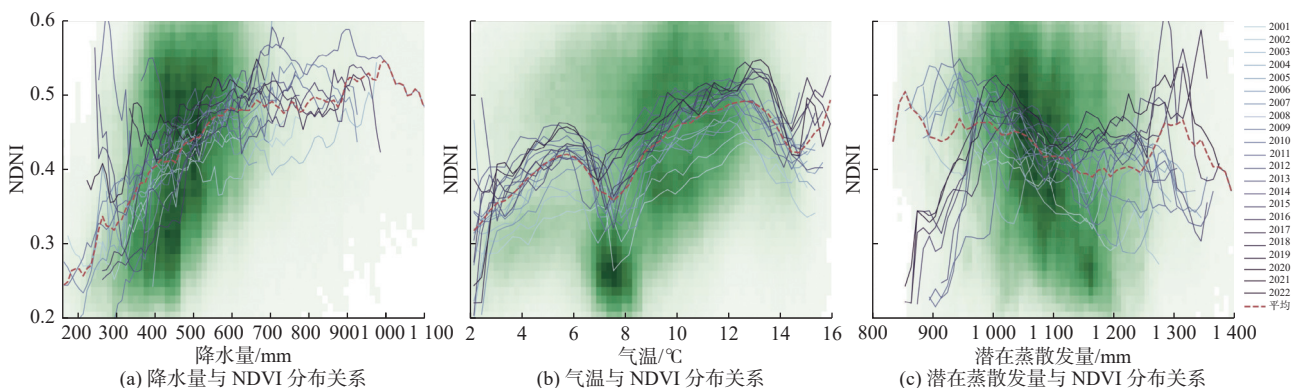


图 7 2001—2022 年气候因子与 NDVI 二维密度曲线

Fig. 7 Climate factor and NDVI density curve from 2001 to 2022

### 2.2.2 气候因子影响滞后时间

通过分析 NDVI 与降水量、气温、潜在蒸散发量 0~3 个月的相关性,识别气候因子对 NDVI 影响的滞后效应,见图 8。植被 NDVI 对降水的响应主要发生在当月,两者相关性最强,相关系数为 0.86,到第 3 个月相关系数已经显著降低,相关系数降至 0.49。植被 NDVI 对气温的响应主要发生在当月和第 2 个月,两者相关系数十分接近,分别为 0.88 和 0.89,同样到第 3 个月相关系数显著降低,为 0.68。植被 NDVI 对潜在蒸散发的响应主要发生在第 2 个月和第 3 个月,NDVI 第 2 个月潜在蒸散发相关性最强,相关系数为 0.92,而与当月相关性最弱,相关系数为 0.73,说明潜在蒸散发对 NDVI 影响存在 1 个月的滞后性。

### 2.3 植被 NDVI 变化归因

采用考虑时滞效应的多元回归残差分析方法,

按 0~3 个月滞后期叠加计算,分析气候变化(降水、气温、潜在蒸散发)对 NDVI 变化的贡献,结果见图 9。在年尺度上,河北山区气候变化对植被 NDVI 的贡献率为 39%,扣除气候变化贡献外,人类活动对河北山区植被 NDVI 变化的平均贡献率为 61%,其中,坝上高原区气候变化和人类活动影响的贡献分别为 37% 和 63%,燕山区气候变化和人类活动影响的贡献率分别为 58% 和 42%,太行山区气候变化和人类活动影响的贡献率分别为 72% 和 28%。

对比考虑气候因子时滞效应和未考虑时滞效应分析结果,见图 9。考虑气候因子时滞效应后多元线性回归的决定系数  $R^2$  由 0.80 提高到 0.87,均方根误差由 0.086 减少到 0.071,平均绝对误差由 0.108 减少到 0.090,改进后的回归模型表现优于初始模型。改进后的模型模拟结果显示,气候因子对河北山区植被 NDVI 变化的贡献率由 32% 增加到 39%,

说明如果不考虑气候因子的时滞效应,会低估气候因子对河北山区植被 NDVI 的贡献。考虑气候因子时滞效应后,从空间分布上看,河北山区有 29% 的区域人类活动对植被 NDVI 变化的贡献率小于 20%, 55% 的区域人类活动对植被 NDVI 变化的贡献率在 20%~80%, 有 16% 的区域人类活动对植被 NDVI

变化的贡献率超过 80%。总的来说,2001—2022 年河北山区人类活动是植被 NDVI 变化的主导因素,河北山区持续开展水土保持工作,通过封育保护、造林种草、坡耕地治理等措施,林草的面积和质量不断提高,极大地改善了河北山区的生态环境质量。

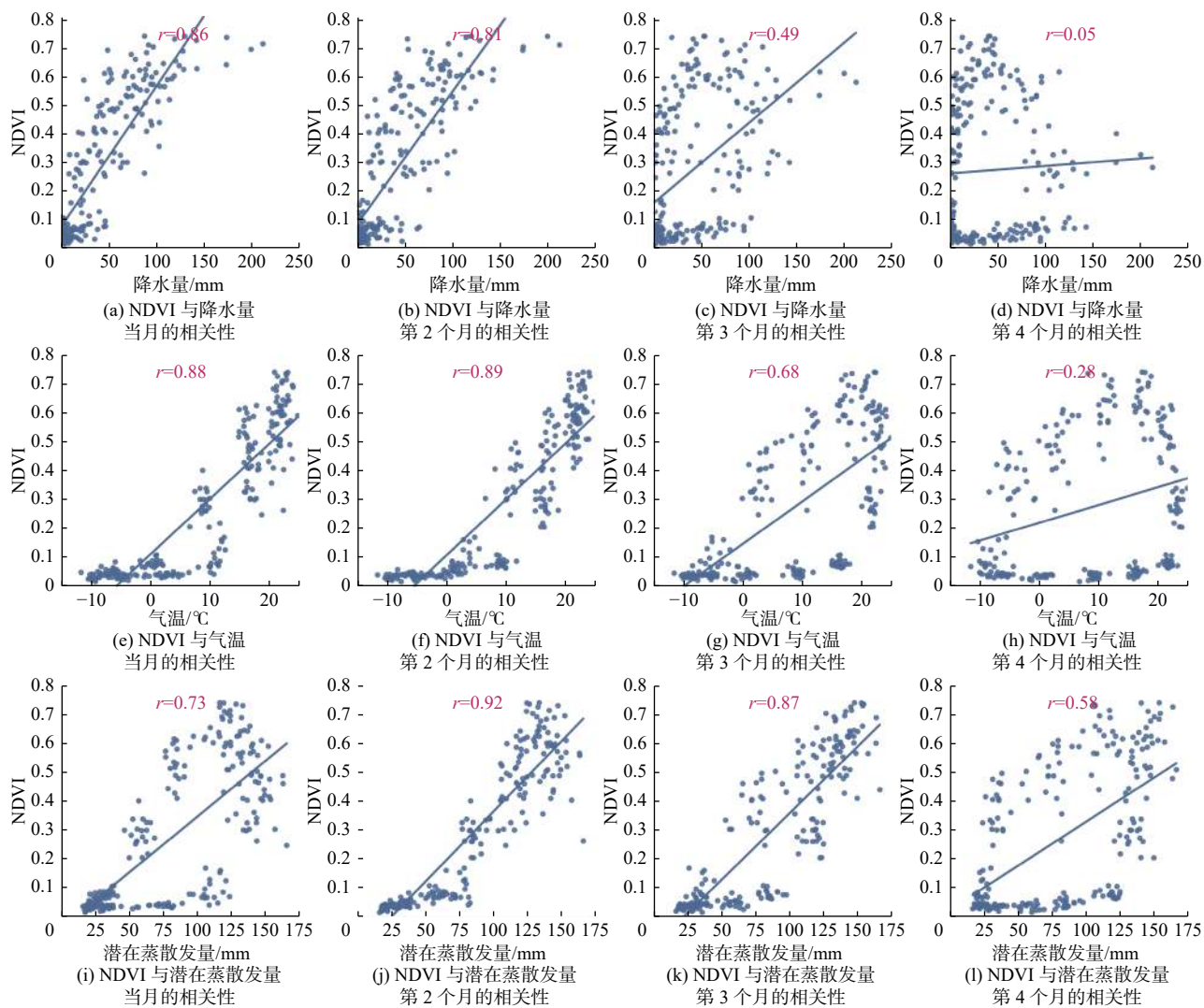


图 8 NDVI 与降水量、气温、潜在蒸散发量 0~3 个月的相关性

Fig. 8 Correlation analysis of NDVI with precipitation, air temperature and potential evapotranspiration from 0 to 3 months

### 3 讨论

气候变化对植被 NDVI 影响的时滞效应是近年来广泛关注的话题,有研究<sup>[31]</sup>表明,从全球尺度上看,低纬度地区植被与气温之间存在明显滞后效应,干旱和半干旱地区植被与降水存在滞后效应。河北山区植被对降水、气温和潜在蒸散发的响应均表现出一定程度的滞后响应特征,其中气温和潜在蒸散发的滞后效应略强于降水,这与黄河流域、新疆地区的研究结论基本一致<sup>[32]</sup>。不同类型植被 NDVI

对气候响应的时滞效应也存在差异,这可能与植被的生长环境以及生长特性差异有关。河北山区北部坝上和燕山部分地区,海拔高、气温低,植被类型以草地为主,在长期演化中草种已经适应高寒的气候,在低温区间存在一个 NDVI 的高值区。在新疆地区研究<sup>[33]</sup>表明,不同类型植被自身特性不同,与乔木相比、灌木和草地植被根系分布较浅,对降水格局变化的响应速率不同,而对气温的响应目前还没有确切的结论,还需要更多的研究成果支撑。

受气候的时滞效应影响,分析对应时间下气候

和植被 NDVI 的相关关系,可能会低估气候变化的贡献,如气候变暖或者暖湿化对植被生长的影响<sup>[34]</sup>。在考虑气候影响时滞效应后,气候因子对河北山区植被 NDVI 变化的贡献率由 32% 增加到 39%,虽然人类干预仍是河北山区植被 NDVI 增加的主导因素,但在不同区域应发挥气候和人类干预的不同作用,如在水土流失严重的区域需强化人类改造自然的能力,尽快遏制水土流失趋势,而在植被相对较好的区域,应以自然恢复为主,实现自然条件下的生态平衡。植被 NDVI 变化是一个极为复杂的过程,本研究涉及的气候因子有限,其他气候因子、地形地貌等影响未做深入分析,这是今后有待进一步研究的内容。

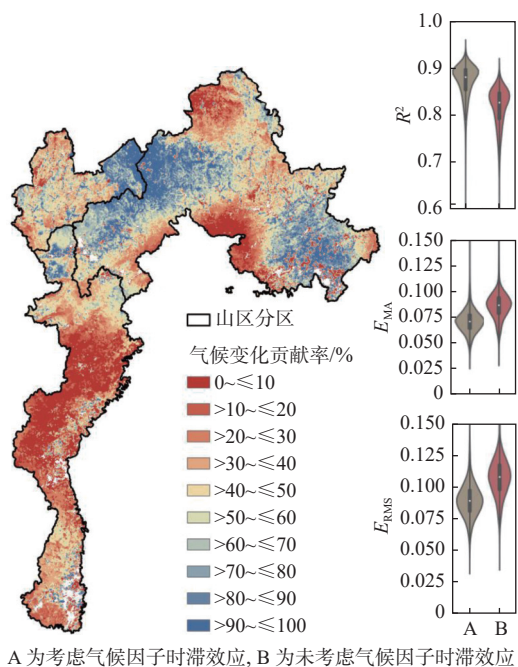


图9 气候变化对河北山区 NDVI 演变贡献率  
Fig. 9 Contribution rate of climate change to NDVI evolution in mountainous area of Hebei Province

#### 4 结论

本文探讨 2001—2022 年河北山区植被 NDVI 的时空变化和趋势,并分析降水量、气温和潜在蒸散发量对其影响的时滞效应,在此基础上利用考虑时滞效应的改进残差分析估算了气候变化和人类活动对植被 NDVI 的贡献率,结论如下:

2001 年以来河北山区植被 NDVI 显著增加,平均增速为 0.003 7/a,其中乔木林、灌木林和草地增速分别为 0.003 5、0.004 0 和 0.003 8/a,说明河北山区植被恢复在不同植被类型下 NDVI 均有提升。河北山区植被物候整体呈现生长季开始时间提前,而

生长季结束时间变化不大,导致植被生长期增加 9 d。考虑植被生长对气候因子的时滞效应后,2001—2022 年河北山区植被 NDVI 变化中气候因子贡献率为 39%,人类活动的贡献率为 61%,若不考虑气候时滞效应将会低估气候因子对 NDVI 演变的贡献。

过去 20 年河北山区植被 NDVI 持续增加、生长季提前,必然对河北山区生态水文过程产生影响,如何在缺水的山区实现植被最优化配置将是下一步的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 王志印,曹建生.中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(9):1319-1331. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190108.
- [2] 刘祥宏,尹勤瑞,辛建宝,等.生态植被自然修复及其人工促进技术研究进展与展望[J].生态环境学报,2022,31(7):1476-1488. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.07.021.
- [3] 曹云生,高国军,陈丽华,等.南水北调北京段PC-CP工程植被恢复效果研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(3):69-72. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.015.
- [4] WANG L L, SHE D, XIA J, et al. Revegetation affects the response of land surface phenology to climate in Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2023(860):160383. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160383.
- [5] 陈淑君,许国昌,吕志平,等.中国植被覆盖度时空演变及其对气候变化和城市化的响应[J].干旱区地理,2023,46(5):742-752.
- [6] 刘琪,景海涛,刘盼盼,等.太行山区NDVI时空变化及其与气候因子的关系[J].西北林学院学报,2023,38(1):1-9,33.
- [7] 李薇,谈明洪.太行山区不同坡度NDVI变化趋势差异分析[J].中国生态农业学报,2017,25(4):509-519. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160781.
- [8] 曹永强,王菲.河北省植被时空变化及其对气象干旱的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):708-719,757. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0074.
- [9] 王彦芳,裴宏伟,赵超.河北坝上地区2000—2019年植被绿度动态及其土地利用/覆被变化归因分析[J].水土保持通报,2021,41(6):345-352. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.044.
- [10] 苏王新,李卓,陈书琴,等.河北坝上地区植被覆盖演化特征及其风险评估[J].干旱区研究,2018,35(3):686-694. DOI: 10.13866/j.azr.2018.03.23.
- [11] 缪利,陆晴,刘根林,等.1999—2019年青藏高原不



- 同植被类型NDVI时空演变特征及其对气候因子的响应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 97-105. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.027.
- [12] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(9): 3557-3568. DOI: 10.5846/stxb202012313335.
- [13] 魏晓帅, 高永龙, 范雅倩, 等. 北京植被净初级生产力对物候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 167-175.
- [14] 张建梅, 马燮铤, 李艳忠. 1980—2016年黄河中游河龙区间植被动态及其对径流的影响[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(3): 91-109. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0054.
- [15] 张聪聪, 孟丹, 李小娟. 京津冀地区植被物候时空变化及其对城市化的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(1): 249-262.
- [16] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 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*, 2020, 75(5): 961-974. DOI: CNKI:SUN:DLXB.0.2020-05-007.
- [17] YAO J Q, HU W F, CHEN Y N, et al. Hydro-climatic changes and their impacts on vegetation in Xinjiang, Central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2019(660): 724-732. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.084.
- [18] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 等. 基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响: 以京津风沙源区为例[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 826-836. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0094.
- [19] ZHENG K, WEI J Z, PEI J Y, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019(660): 236-244. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.022.
- [20] WU D, ZHAO X, LIANG S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change[J]. *Global Change Biology*, 2015(21): 3520-3531. DOI: 10.1111/gcb.12945.
- [21] 安德帅, 徐丹丹, 濮毅涵, 等. 2000—2019年武夷山亚高山草甸对气候因子的响应及其时滞效应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4195-4202. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202112.001.
- [22] WEN Y Y, LIU X P, YANG J, et al. NDVI indicated inter-seasonal non-uniform time-lag responses of terrestrial vegetation growth to daily maximum and minimum temperature[J]. *Global and Planetary Change*, 2019(177): 27-38. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.03.010.
- [23] MA M, WANG Q, LIU R, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage change in northern China considering extreme climate and time-lag and -accumulation effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2023(860): 160527. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160527.
- [24] 万育生, 王栋, 黄朝君, 等. 丹江口水库来水情势分析与径流预测[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 417-426. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0045.
- [25] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438. DOI: 10.11849/zrzyxb.20170139.
- [26] 徐勇, 郑志威, 戴强玉, 等. 顾及时滞效应的西南地区植被NPP变化归因分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 297-305, 339. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.033.
- [27] 左德鹏, 韩煜娜, 徐宗学, 等. 气候变化对雅鲁藏布江流域植被动态的影响机制[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 1-8. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.001.
- [28] 杜军凯, 贾仰文, 郝春洋, 等. 太行山区蓝水绿水沿垂直带演变规律及其归因分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 16(2): 64-73. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0040.
- [29] LI P, WANG J, LIU 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. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105331.
- [30] EVANS J, GEERKEN R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004(57): 535-554. DOI: 10.1016/S0140-1963(03)00121-6.
- [31] WEN Y Y, LIU X P, PEI F S, et al. Time - lag effects of Non-uniform time-lag effects of terrestrial vegetation responses to asymmetric warming[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018(252): 130-143. DOI: DOI:10.1016/j.agrformet.2018.01.016.
- [32] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342. DOI: 10.5846/stxb201404150731.
- [33] 张鑫, 邢亚娟, 闫国永, 等. 细根对降水变化响应的meta分析[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(2): 164-172. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0203.
- [34] ISLAM A, ISLAM H, SHAHID S, et al. Spatiotemporal nexus between vegetation change and extreme climatic indices and their possible causes of change[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021(289): 112505. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112505.

## Attribution analysis of NDVI evolution in mountainous area of Hebei Province considering climate delay effect

TIAN Weitang<sup>1</sup>, LIU Miao<sup>2</sup>, ZHANG Ziyuan<sup>1</sup>, ZHANG Xuepei<sup>1</sup>, WANG Qingming<sup>3</sup>

(1. Soil and Water Conservation Work Station of Hebei Province, Shijiazhuang 050011, China; 2. Hebei Institute of Water Resources, Shijiazhuang 050057, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Since 2000, large-scale comprehensive control of soil and water loss has been carried out in the mountainous areas of Hebei Province. Through measures such as enclosure protection, afforestation and grass planting, and return of farmland to forest, the ecological environment in the mountainous areas has been significantly improved, especially the vegetation coverage in the mountainous areas has been significantly increased. However, the current research has not systematically analyzed the vegetation evolution law and causes in the mountainous areas of Hebei Province. It was difficult to scientifically evaluate the comprehensive control of soil and water loss in mountainous areas of Hebei Province. When analyzing the causes of vegetation evolution, the traditional multiple linear regression method usually adopts the climate variables and vegetation variables corresponding to each month, and fails to consider the "time-lag effect" of climate factors, which may lead to underestimating the contribution of climate factors.

The evolution of NDVI in mountainous areas of Hebei Province was systematically studied from the aspects of vegetation types, vegetation phenology and time delay effect of climate factors. On this basis, a multiple linear regression model was established considering the time delay effect of climate, which is expected to answer the cause of NDVI evolution more accurately. With precipitation  $P$ , temperature  $T$  and potential evapotranspiration  $P_{ET}$  as independent variables and vegetation NDVI as dependent variables, a multiple linear regression model was constructed to improve the traditional residual analysis method, and the effects of climate change and human activities on vegetation NDVI changes were stripped away.

The results showed that NDVI in mountainous areas of Hebei showed a continuous growth trend from 2001 to 2022, with an average growth rate of 0.0037/a. The growth rates of woodland, shrub and grassland were 0.0035/a, 0.0040/a and 0.0038/a, respectively. Using the Mann-Kendall trend test method to analyze the significance of NDVI change, it was found that 78% of the regions showed a very significant increase trend, 11% showed a significant increase trend, and only less than 2% showed a significant decrease or an extremely significant decrease trend, indicating that the vegetation recovery effect of the whole Hebei mountain region after 2001 was remarkable. Due to the influence of climate change, the growth period of vegetation in mountainous areas of Hebei Province became longer, and the start time of the growing season was advanced by 9 days on average, while the end time of the growing season was advanced by only 1 day. SOS in Bashang Plateau, Yanshan District and Taihang Mountain area advanced by 6 d, 11 d and 8 d, and EOS advanced by 2 d, 1 d and 1 d, respectively, meaning that the whole growing season increased by 4 d, 10 d and 7 d, respectively. The influence of precipitation on vegetation NDVI mainly occurs in the same month, while the influence of air temperature and potential evapotranspiration on vegetation NDVI has a one-month lag. After considering the time-lag effect of climate, the contribution of climate change and human activities to the evolution of NDVI in mountainous areas of Hebei is 39% and 61%, respectively. After considering the delay effect of climate factors, the coefficient of determination  $R^2$  of multiple linear regression increases from 0.80 to 0.87, the root mean square error decreases from 0.086 to 0.071, and the average absolute error decreases from 0.108 to 0.090. The performance of the improved regression model is better than that of the original model.

Since 2000, the main contribution of NDVI growth in mountainous areas of Hebei Province has been artificial vegetation restoration, but at the same time, the lengthening of growing season caused by climate change is also an important reason. Studying and identifying the impact of climate change and human activities has important guiding significance for further rational and efficient soil and water conservation in mountainous areas.

**Key words:** mountainous area of Hebei; NDVI; hysteresis effect; change attribution; vegetation phenology