

太行山区 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系

刘 琪,景海涛*,刘盼盼,汤金颖,王 磊

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院,河南 焦作 454000)

摘 要:为明确太行山区长时间尺度植被覆盖度变化规律及其对气候因子的响应机制,采用 1998—2018 年的 SPOT VEGETATION/NDVI 卫星遥感数据,通过趋势线分析法、相关系数法与时滞相关分析法等,从时间和空间 2 个尺度分析太行山区植被生长状况、覆盖变化及其对气温和降水的响应程度。结果表明:1)太行山区总体植被覆盖率较高,77.5% 区域面积的 NDVI 值在 0.6~0.8 范围内;2)21 a 间太行山区 NDVI 值随时间呈现波浪式显著增加趋势,平均增长速率为 0.03/10 a(线性增长率为 0.067/10 a),通过 0.01 的显著性检验;太行山区植被覆盖在空间分布上呈现西北低、东南高,中部区域高低值交叉分布的特点;3)太行山区 NDVI 与气温在空间上呈现负相关为主,呈负相关面积约占太行山区总面积的 54.37%,主要分布在太行山区的中部区域、南部边缘区域以及东北沿线区域;NDVI 与降水呈现正相关为主,呈正相关的面积约占太行山区总面积的 81.89%,整体上可以概括为从太行山区的西北区域到东南区域相关系数(R)逐渐变小。4)时间尺度上,NDVI 与气温和降水均没有明显的相关性,但 NDVI 与降水的相关系数($R=0.286$)大于与气温的相关系数($R=0.026$);5)在滞后性分析中,太行山区 NDVI 与气温和降水在月时间尺度上有明显的时间滞后性关系,其中 NDVI 与气温的滞后性是 1 个月,与降水的滞后性是 2 个月。

关键词:植被覆盖度;NDVI;太行山;时间滞后性;相关性分析

中图分类号:S716.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)01-0001-09

Research on the Relationship Between Temporal and Spatial Changes of NDVI and Climate Factors in the Taihang Mountains

LIU Qi, JING Hai-tao*, LIU Pan-pan, TANG Jin-ying, WANG Lei

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: In order to clarify the regularity of long term vegetation cover changes in the Taihang Mountains and its response mechanism to climate factors, in this paper, SPOT VEGETATION/NDVI satellite remote sensing data from 1998—2018 were used to analyze the vegetation growth status, cover changes and its response degree to the temperature and precipitation in the area of the Taihang Mountains from both temporal and spatial scales by the trend line analysis, correlation coefficient and time lag correlation analysis methods. The results showed that 1) the overall vegetation coverage rate was high in the Taihang Mountains, and the NDVI-value of 77.5% area was 0.6—0.8. 2) During last 21 years, the NDVI-value in the Taihang Mountains increased significantly with time in a wave pattern, the average growth rate was 0.003/10a (the linear growth rate was 0.067/10a) and passed the significance test of 0.01. The spatial distribution of the vegetation cover in the Taihang Mountains showed the characteristics of low in the north-west and high in the southeast, and the cross distribution of high and low values in the central region. 3) From the spatial scale, The NDVI was mainly negatively correlated with air temperature, accounting for

收稿日期:2021-11-15 修回日期:2021-12-16

基金项目:国家自然科学基金青年基金(41801318);河南省科技攻关计划(212102310432);河南理工大学博士基金(B2017-14)。

第一作者:刘 琪。研究方向:生态遥感和国土空间规划。E-mail:1217427369@qq.com

*通信作者:景海涛,博士,教授,硕士生导师。研究方向:3S 技术集成与应用。E-mail:jht@hpu.edu.cn

54.37% of the total area, and mainly distributed in the central region, southern edge and along the north-east regions. The NDVI was mainly positively correlated with precipitation, accounting for 81.89% of the total area. In general, the correlation coefficient (R) became progressively smaller from the northwest region to the southeast region in the Taihang Mountains. 4) From the time scale, The NDVI had no significant correlation with temperature and precipitation, but the correlation coefficient between NDVI and precipitation ($R=0.286$) was bigger than that between the NDVI and temperature ($R=0.026$). 5) About the lag analysis, there was an obvious time lag relationship among the NDVI, temperature and precipitation in the Taihang Mountains. The lag between NDVI and temperature was one month and between the NDVI and precipitation was two months.

Key words: vegetation coverage; NDVI; the Taihang Mountains; time lag; correlation analysis

植被是陆地生态系统的核心组成部分,是重要的自然资源,起到连接生态系统中大气、土壤、水分等自然因子的纽带作用^[1,2]。植被的改善有助于提高水源涵养和水土保持功能,对植被的时空变化趋势监测在全球气候变化背景下的陆地生态系统研究具有重要意义^[3]。植被遥感数据凭借优异的空间和时间特征,现已成为监测全球及区域尺度植被的生长状态、地表覆盖变化等植被信息的关键数据源。当前用于度量植被变化的植被指数有很多,其中归一化植被指数(NDVI)既能够表征植被覆盖的整体状况,且与植被覆盖度之间存在显著的线性关系,是最常用的表征植被生长状态和覆盖度的指标,被广泛用于植被变化及其驱动因子的研究当中^[4]。

目前,国内外学者针对植被覆盖度的变化及其影响因子已经做了大量的研究^[5-7]。研究结果表明,NDVI与气候因子有着显著的相关关系^[8,9],气候条件是影响植物生长的关键性条件^[10]。伴随着经济快速发展,各地生态系统频繁遭到损伤,全球气候变暖趋势日益严重^[11]。基于此,理解和揭示植被与气候因子之间的内在联系,对于区域生态保护治理具有重要的意义。太行山地处我国第2阶梯的东沿,是平原到山地高原的过渡带。同时,又是东部经济发达地区到中西部经济欠发达地区的过渡带^[12]。目前关于太行山区的植被变化研究已经取得相当一部分的成果,李新元等^[4]对太行山区NDVI变化及驱动因素分析发现气象因素对NDVI变化起促进作用;李薇等^[13]对太行山区不同坡度NDVI变化趋势分析发现,太行山区不同坡度NDVI变化趋势存在显著差异;范松克^[14]对于太行山南麓进行归一化植被指数变化及成因分析发现,NDVI与气温和降水呈正相关等,已有的研究结果虽能一定程度反映植被与气象因子的相关关系,但大多为整体上分析太行山区植被覆盖变化驱动因子的研究,很少单独考虑气象因子对太行山区植被覆盖变化趋势的影响,缺乏植被对气象因子响应机制的深层分析,并且未考虑植

被对气象因子的时滞效应。

本研究基于1998—2018年21 a时间序列的NDVI数据,采用一元线性回归及趋势分析等方法,分析太行山区植被的时空变化特征;同时,结合气候数据,利用相关分析、滞后性分析和统计分析等方法,在时间尺度和空间尺度探讨植被与气候因子的响应关系,分析NDVI与气温和降水的时间滞后关系,为太行山区的植被变化监测、生态环境保护和治理提供有力的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太行山区即太行山地及其毗邻区域^[15]($34^{\circ}34' - 41^{\circ}06'N$, $110^{\circ}13' - 114^{\circ}33'E$),总面积约12.7万 km^2 ,纵跨北京、河北、山西、河南4省市,山脉北起北京市西山,向南延伸至河南与山西交界地区的王屋山,西接山西高原,东临华北平原,呈东北—西南走向。太行山区是中国地形第2阶梯的东缘,也是黄土高原的东部界线,海拔39~2 994 m,最高峰是五台山(图1)。太行山区地势北高南低,地貌类型复杂,从气候上看,太行山属于温带半湿润大陆性季风气候,年均气温为10.3℃,年降水量为501.8 mm。全年冬无严寒,夏无酷暑,雨热同季,虽四季分明,但冬长夏短。

1.2 数据来源与处理

NDVI数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn/),NDVI数据集是基于SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据,在旬数据基础上采用最大值合成法生成的月度植被指数数据集,时间跨度为1998—2018年,空间分辨率为1 km。所获取的NDVI数据经过水、云、气溶胶等处理,有效减弱了其他因素对数据的影响,提高了数据的准确性。对于获取的NDVI数据进行简单预处理,在ArcGIS中通过太行山区矢量边界进行掩膜裁剪,使用栅格计算器计算出月、年植被指数NDVI数据集。

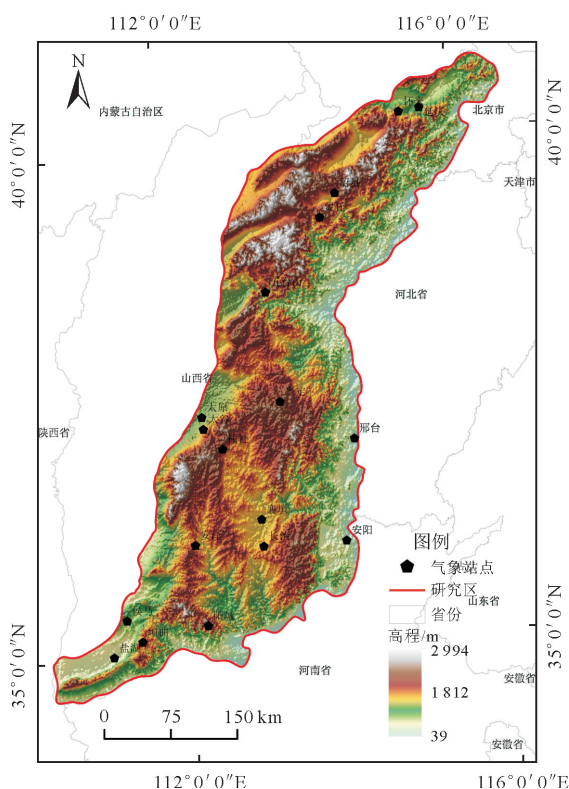


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

气象数据来源于中国气象网 (<http://www.cma.gov.cn/>), 时间跨度 1998—2018 年。通过 Python 编程从全国所有的站点中选取太行山区内的 18 个基准气象监测站点的日均气温和日累计降水量, 进一步处理获取月均气温/降水和年均气温/降水数据。根据各气象站的经纬度将气温、降水信息导入 ArcGIS 空间分析模块运用反距离权重法进行空间插值。通过太行山区矢量边界进行掩膜裁剪、重采样、重投影得到与 NDVI 数据具有相同像元大小、相同坐标系的栅格影像数据集。

DEM 数据由美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 SRTM (shuttle radar topography mission, SRTM) 数据经重采样生成, 空间分辨率为 1 km。将 DEM 数据导入 ArcGIS 中并计算出高程, 使用太行山区矢量边界进行掩膜裁剪、重采样、重投影得到与 NDVI 数据具有相同像元大小、相同坐标系的栅格影像数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 NDVI 变化趋势分析 采用一元线性回归方程的斜率来模拟栅格点的变化趋势^[16,17], 斜率的正负表示变化趋势的增减。进而模拟分析 NDVI 的年际变化趋势, 计算公式为:

$$s_{\text{lope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times N_{\text{DVI}i} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n N_{\text{DVI}i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (n \times \sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: s_{lope} 为 1998—2018 年太行山区 NDVI 的变化速率; n 为研究的时间序列长度, 取 $n=21$; i 为 1~21 的年序号; $N_{\text{DVI}i}$ 为第 i 年 NDVI 值。在 Arc GIS 中进行栅格数据的计算与统计分析得出太行山区 21 a NDVI 年际变化趋势。

1.3.2 相关分析性 采用皮尔逊 (Pearson) 相关性分析方法, 对 NDVI 数据与气温、降水空间插值数据进行逐像元相关性分析^[18-20]。由此来反映出气温与降水等气候要素与 NDVI 序列的时间相关程度和空间分布规律。相关系数计算公式为:

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

式中: r_{xy} 为 NDVI 与气候要素气温/降水的相关系数, 取值范围为 $[-1, 1]$; x_i, y_i 分别为 NDVI、气温/累计降水第 i 年的值; \bar{x}, \bar{y} 分别为研究时段内 NDVI 平均值、气温或降水平均值。

通过查阅相关系数表, 结合研究区具体情况, 进行显著性等级划分。当 $n=21$ 时, r_{xy} 的相关性等级划分见表 1。

表 1 显著性等级划分

Table 1 Significance classification

	不显著	显著	极显著
正相关	(0, 0.432 86)	(0.432 86, 0.548 71)	(0.548 71, 1)
负相关	(-0.432 86, 0)	(-0.548 71, 0.432 86)	(-1, 0.578 71)

1.3.3 偏相关性分析 相较于简单相关分析, 偏相关分析是探索植被生长与单一气候因子之间的联系, 可剔除其他气候因子的影响, 有助于更好地分析影响植被变化的气候因子主控因素, 被广泛用于检测影响植被生长的主要气候驱动因子^[21]。计算方法如下:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (3)$$

式中: x 为 NDVI; y 为气温 ($^{\circ}\text{C}$); z 为降水 (mm); $r_{xy,z}$ 为将降水固定后气温与 NDVI 的偏相关系数, 降水与 NDVI 的相关系数同理。

1.3.4 滞后性分析 利用滞后相关系数进行太行山区 NDVI 对气候因素的滞后性分析^[17,18]。将月均 NDVI 与同期、前 1 个月以及前 2 个月的月均气温/降水数据进行相关性分析, 根据相关系数和显著性检验结果进行统计分析, 相关系数越大, 显著性越强则代表 2 个因素间相关性越强。通过比较相关性的大小来确定时间滞后关系。计算公式为:

$$R_{\text{max}} = \max \{ |R_0, R_1, R_2, R_3 \dots| \} \quad (4)$$

式中: R_{max} 表示最大的相关系数; R_0, R_1, R_2, R_3

……分别表示与同期、前 1 个月、前 2 个月、前 3 个月……的相关系数,以此类推。若 $R_{\max} = R_A$, 即代表滞后 A 个月。

1.4 研究流程

在遥感、GIS 技术的理论支撑下,采用 NDVI 卫星遥感数据和气象插值数据,运用统计学思想并结

合 Python 语言进行数据处理分析。在时间、空间 2 个尺度展开对太行山区植被的变化特征及其对气象数据变化的响应关系进行研究分析,以明确太行山区 21 a 来植被变化与气候因子的响应关系,为太行山区生态保护治理提供科学支撑。技术路线见图 2。

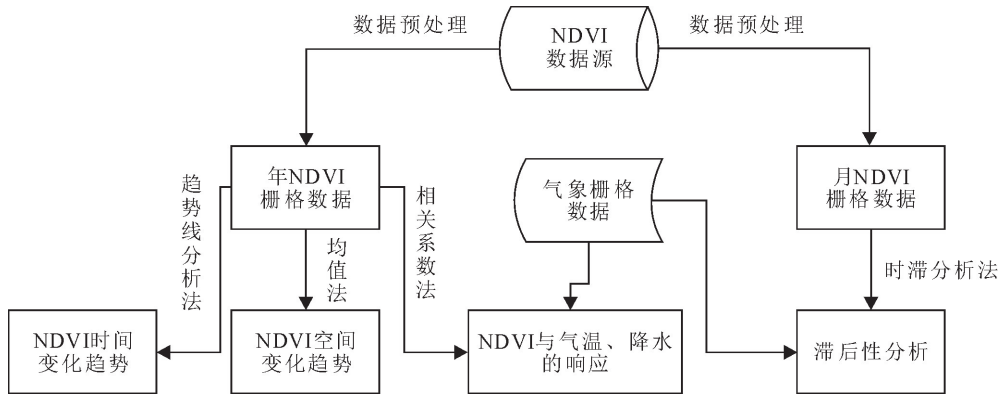


图 2 本研究技术路线

Fig. 2 Technique route of this study

2 结果与分析

2.1 NDVI 的时间变化趋势

对逐年 NDVI 数据集(1998—2018 年)进行统计分析年际 NDVI 变化总体趋势(图 3)。太行山区的 NDVI 值介于 0.62~0.78,2001 年植被 NDVI 为最小值 0.62,2018 年植被 NDVI 出现最大值 0.78,21 a 间太行山区 NDVI 涨幅约 25%。结合图像和拟合的线性函数可知,太行山区的 NDVI 呈波浪式的增长趋势,平均增长速率为 0.03/10 a(线性增长率为 0.067/10 a),其中 $R^2=0.849$,通过 0.01 显著性,说明 NDVI 的总体变化趋势与时间相关性显著。

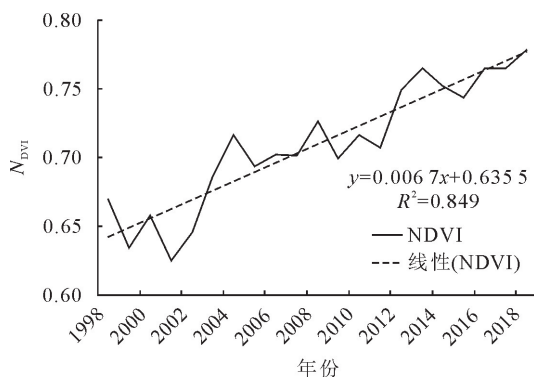


图 3 NDVI 年际趋势

Fig. 3 Inter-annual trend of NDVI

利用 Mann-Kendall 方法对 NDVI 变化趋势进行显著性检验和突变点检测^[22](图 4)。由 M-K 检验可知年均 NDVI 的 Z 值为 4.74,通过 0.01 的显

著性检验,说明 NDVI 的年际增加趋势明显,与 R^2 的结果呼应。由突变点检测可知,1998—2018 年太行山 NDVI 的突变点是 2010 年,且超出临界值 1.96,说明突变并不显著。结合温度与降水的数据分析可知,2010 年 NDVI 的突变可能是由于气温降低和降水异常增加等气候因素所导致的。综合分析可知,在时间尺度上太行山区的整体植被生长状态良好(0.67~0.78),且增长趋势显著性明显,结合 NDVI 的时间变化趋势方程($y = 0.0067x + 0.6355$),预测太行山区植被生长状态未来会进一步提升。

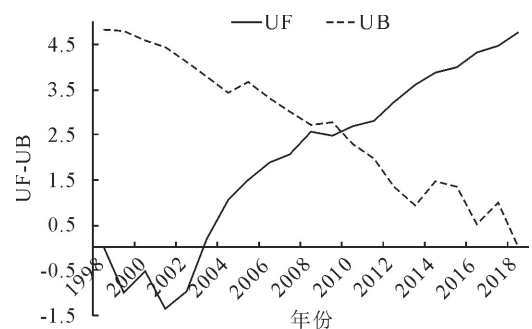


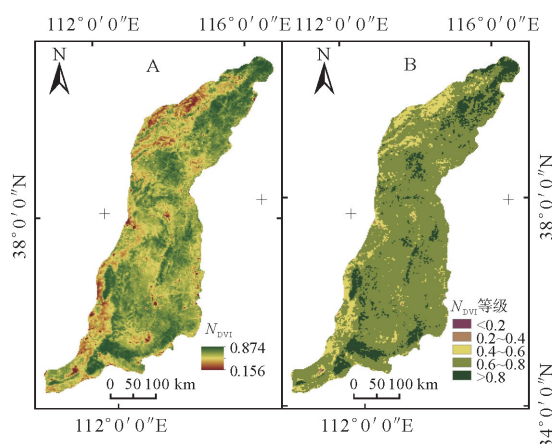
图 4 M-K 趋势检验

Fig. 4 M-K trend test chart

2.2 NDVI 的空间变化趋势

对 1998—2018 年太行山区年 NDVI 采用均值法得到太行山区 21 a 的 NDVI 的空间分布图(图 5A)。由图 5 可知,研究区的植被覆盖状况在空间分布上有明显的区域性差异,呈现出西北低、东南高、中部区域高低值交叉分布的特点;太行山区

N_{DVI} 的空间分布值介于 0.16~0.87。通过阅读文献[4,6,20]和查找资料,结合太行山区的实际情况,将太行山区的 NDVI 进行等级划分,划分结果为 <0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、>0.8 这 5 个等级(图 5B)。对各个等级的 NDVI 进行逐像元统计分析,各部分像元所占的比例为 3:83:3 200:24 666:3 865。其中太行山区 89.67% 区域的 N_{DVI} >0.6,77.5% 区域的 N_{DVI} 介于 0.6~0.8,整体看,太行山区植被覆盖度良好。为更好地描述太行山区 NDVI 在空间尺度的分布,结合县级区划图在 ArcGIS 中进行讨论分析,可知太行山区西北沿线区域(怀来、延庆、古县以及浮山县等)的 N_{DVI} 为 0.4~0.6;在太行山东南区域(夏县、阳城、泽州等)的 N_{DVI} >0.8;而小于 <0.2 及 0.2~0.4 的 NDVI 区域主要呈零星状分散在太行山区。这也正好符合太行山区 NDVI 西北低、东南高的区域差异性分布规律。



A. 空间分布;B. 等级划分。

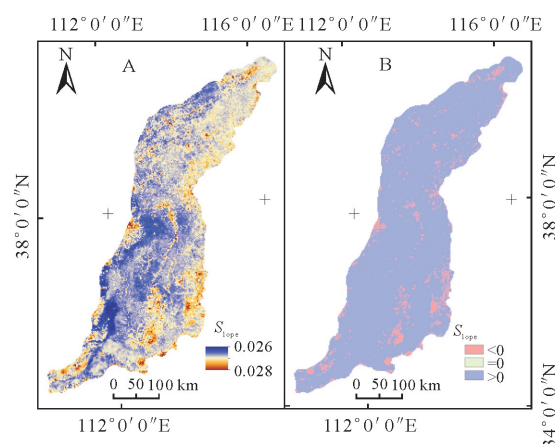
图 5 NDVI 空间分布和等级划分

Fig. 5 (a) Spatial distribution of NDVI (b) Classification of NDVI

对太行山区 1998—2018 年 NDVI 逐像元做一元线性回归分析,根据逐像元 NDVI 的变化率得出 NDVI 变化趋势的空间分布格局(图 6A)。根据回归显著性检验结果($P < 0.01$),将太行山区植被 NDVI 变化情况划分为显著减少($s_{lope} < 0$)、无显著变化($s_{lope} = 0$)和显著增加($s_{lope} > 0$)3 类(图 6)。在 ArcGIS 中统计分析可知,显著增加($s_{lope} > 0$)的像元个数占总像元个数的 93.46%,占太行山区的大部分面积;显著减少($s_{lope} < 0$)的像元个数占总像元个数的 6.52%,且主要集中在太行山区的东部边缘沿线(昌平—房山—易县—顺平—曲阳—平山—鹿泉,武安—邯郸—林州—鹤壁—辉县—焦作—济源等)、西部边缘沿线(永济—运城—侯马—临汾,延庆—怀来—广灵—浑源—应县—代县)以及中部的阳泉市、昔阳市、中南部的长治市、高平市和晋城市等地,其

中东部沿线显著减少($s_{lope} < 0$)的像元个数和聚集程度明显大于西部沿线。

为更好探究太行山区 NDVI 的空间变化趋势,结合 DEM 数据进行叠加统计分析可知,太行山区 NDVI 变化呈显著减少区域($s_{lope} < 0$)主要集中在海拔高度 500 m 左右的区域,这些区域地势平坦,随着经济发展和城市的扩张,大量的耕地和林地转为建设用地,导致这些区域的植被覆盖度减少。而太行山区 NDVI 变化呈显著增加区域($s_{lope} > 0$)主要集中在海拔 1 500 m 左右的区域,这些区域高程较高,地势较陡,人类活动相对较弱,所以植被可以自然生长,植被覆盖度逐年增高。太行山区 NDVI 变化趋势的分析进一步验证了前面 Mann-Kendall 方法的结果,太行山区植被覆盖逐年变好并且显著性明显。



A. 年际变化趋势;B. 变化趋势分类。

图 6 NDVI 年际变化趋势和分类

Fig. 6 (a) Inter-annual variation trend of NDVI (b) Classification of variation trend of NDVI

2.3 NDVI 与气温/降水的相关性分析

2.3.1 NDVI 对气温的响应关系

为研究 NDVI 与气温在时间尺度上的相关性,对太行山区 1998—2018 年的年均 NDVI 与年均气温进行统计分析,绘制年均 NDVI 和年均气温变化趋势图,并添加年均气温线性趋势线和趋势方程(图 7)。基于变化趋势图分析太行山区 NDVI 与气温的年际关系,并在 SPSS 中进行显著性检验,结果见表 2。

结合图 7 和表 2 分析可知,太行山区年际平均气温在 10.0~11.5 °C,且太行山区年均气温变化趋势平缓。年均气温在 2017 年最大(11.46 °C),2012 年最小(10.08 °C),年均气温的变化趋势为 0.039/10 a。在显著性检验中,相关系数 $R^2 = 0.026$,显著性 $P = 0.91$,未通过 0.05 的显著性检验。年均 NDVI 与年均气温在年际时间尺度上不存在显著的相关性。

太行山区不同地方不同的自然条件、植被的生

长状态和种类不同,对于气温和降水的响应程度各不相同,故采用偏相关性分析来研究太行山区 NDVI 对气温和降水在空间尺度的响应关系,并根据表 1 对偏相关性进行显著性等级划分。

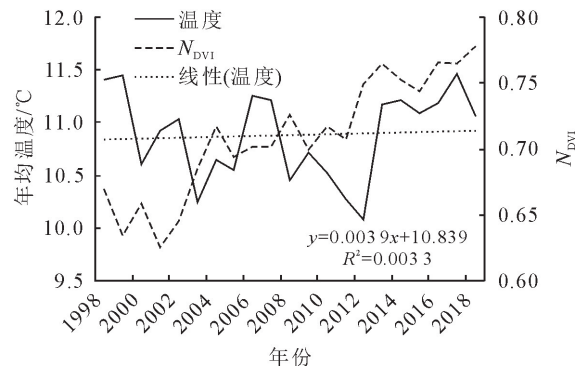
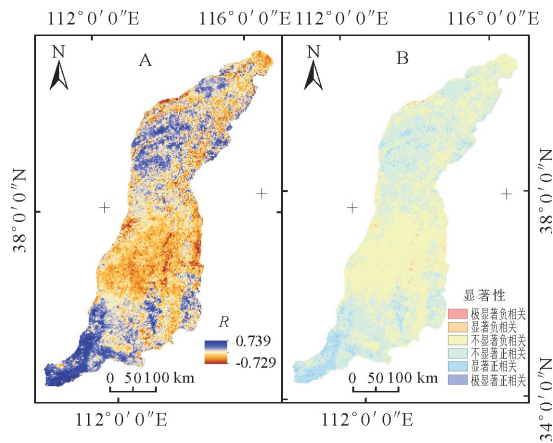


图 7 年均气温变化趋势

Fig. 7 Change trend of annual average temperature

太行山区年均 NDVI 与年均气温的偏相关系数和显著性等级见图 8。太行山区植被 NDVI 与气温在空间上呈现负相关趋势,但趋势并不显著。大体上可以概括为,太行山区中部地区 NDVI 与气温呈负相关,西南、西北地区呈正相关。NDVI 与气温在空间上呈负相关的面积占总体面积的 54.37%,主要是太行山区的中部地区即山西省的东南部分区域(武乡县、襄垣县、沁县、长治市等)和南部边缘区域(辉县、焦作、博爱、济源等)以及东北区域沿线(延庆、昌平、房山、易县等)。其中通过 0.05 显著性检验的区域仅有 0.96%,未通过显著性检验的面积占 53.41%。NDVI 与气温在空间上呈正相关的面积占总体面积的 45.63%,主要是太行山区的西南区域(永济、运城、芮城、平陆、夏县等)和西北区域(涿鹿、蔚县、广灵、灵丘、繁峙等),其中通过 0.05 显著性检验的区域有 1.34%,未通过 0.05 显著性检验的面积是 44.29%。



A. 偏相关系数;B. 显著性检验。

图 8 NDVI 与气温偏相关系数及显著性检验

Fig. 8 Partial correlation coefficient between NDVI and temperature Significance test

2.3.2 NDVI 对降水的响应关系 同理绘制年均 NDVI 和年累计降水量变化趋势图,并添加年累计降水量的线性趋势线和趋势方程(图 9),并在 SPSS 中将结果进行显著性检验(表 2)。

结合图 8 和表 2 可知,太行山区年际年累计降水量在 385~685 mm,且太行山区年累计降水变化波动明显。年累计降水量在 2001 年最少(385.59 mm),2003 年最多(664.45 mm),年均累计降水量趋势为 21.279 mm/10 a。在显著性检验中,相关系数 $R^2=0.286$,显著性 $P=0.209$,未通过 0.05 的显著性检验,即年均 NDVI 与年累计降水量在年际时间尺度上不存在显著的相关性。但相较于年均气温与年均 NDVI 的相关系数和显著性检验结果,年均 NDVI 与年累计降水量的相关系数较大、显著性更强,故年均 NDVI 与年累计降水量在年际时间尺度上相关性更强。

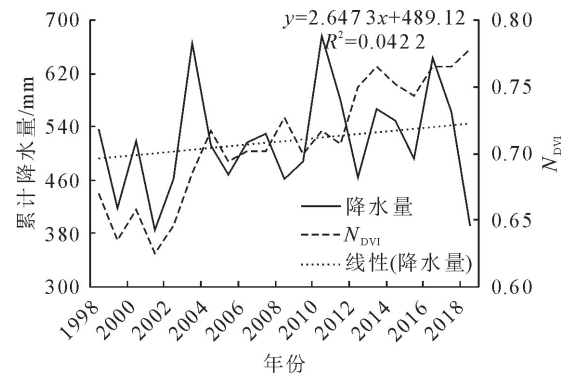


图 9 年累计降水量变化趋势

Fig. 9 Change trend of annual cumulative precipitation

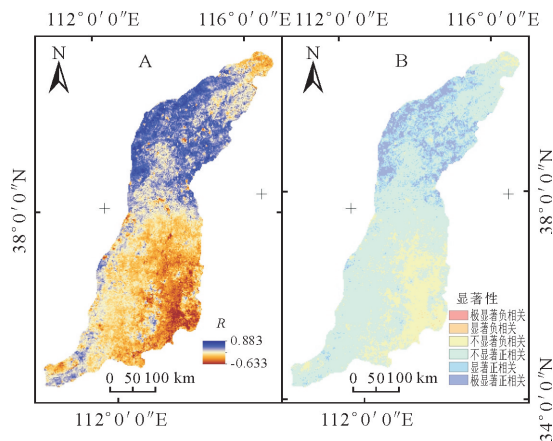
表 2 月均 NDVI 与不同时期气温和降水的相关性

Table 2 Correlation between monthly the NDVI and temperature and precipitation in different periods

	同期	前 1 个月	前 2 个月
气温	0.355	0.916	-0.560
降水	0.580	0.214	0.853

太行山区年均 NDVI 与年累计降水量的偏相关系数和显著性等级见图 10。由图 10A 可知,太行山区植被 NDVI 与降水相关性在空间上呈现以正相关为主的趋势。整体上可以概括为从西北到东南相关系数逐渐变小。NDVI 与降水在空间上呈正相关面积占总体面积的 81.89%,呈负相关面积占总体面积的 18.11%。除太行山区东南区域沿线(左权—涉县—平顺县—林州市—陵川县—焦作市)和北部边缘区域(延庆县、北京市部分区域)与降水是负相关外,其余区域与降水都呈现正相关。由图 10B 可知,NDVI 与降水呈正相关区域中通过 0.01 显著性检验的区域有 8.42%,通过 0.05 显著性检

验的区域有 12.53%,未通过显著性检验的有区域有 60.94%,呈不显著正相关。呈负相关区域中通过 0.05 显著性检验的区域仅有 0.1%,其他区域都呈不显著负相关。



A. 偏相关系数;B. 显著性检验。

图 10 NDVI 与降水偏相关系数及显著性检验

Fig. 10 Partial correlation coefficient between NDVI and precipitation Significance test

2.3.3 NDVI 变化驱动因子分区 为了更好地分析 NDVI 对气温和降水的响应关系,探究造成 NDVI 在不同地理空间上的差异,参考陈云浩等^[23]的研究,对太行山区 NDVI 变化进行驱动因子分析研究,空间分布结果见图 11,统计分析结果见图 12。

将驱动因子分区空间分布结果(图 11)与高程图(图 1)进行叠加分析可知,太行山区有约 57% 的区域受气温和降水的共同影响,其中受气温、降水强影响的区域([T+P]+)面积约 56%(T 表示气温驱动型区域,P 表示降水驱动型区域),在空间上呈从西南到东北逐渐减少趋势,并主要集中在海拔 0~1 000 m;受气温、降水弱影响的区域([T+P]-)面积约 1%,主要呈零星点状分布在太行山区的南部,并主要分布在海拔 1 000~1 500 m;受降水驱动型的区域(P)面积约 27%,主要分布在太行山区的北部,在不同海拔上并没有明显的分布差异(500~1 500 m);受气温驱动型的区域(T)面积约 12%,主要分布在太行山区的南部以及太行山区北部的边缘区域(延庆、昌平等),海拔 1 000~1 500 m;只有南部的少部分地区(4%)是非气候因子驱动型(NC),即人类活动对太行山植被的影响,海拔在 500 m 左右。

2.4 滞后性分析

为了更深入地研究太行山区 NDVI 对气温/降水的响应关系,考虑到气候因子对植被覆盖度存在滞后性,故对太行山区的 NDVI 与气温和降水进行年内关系分析。将月均 NDVI 与同期的月均气温/

降水、前 1 个月的月均气温/降水、前 2 个月的月均气温/降水进行相关性分析(表 2),并对相关系数进行显著性检验。以此来验证太行山区 NDVI 与气温和降水间的滞后性关系。

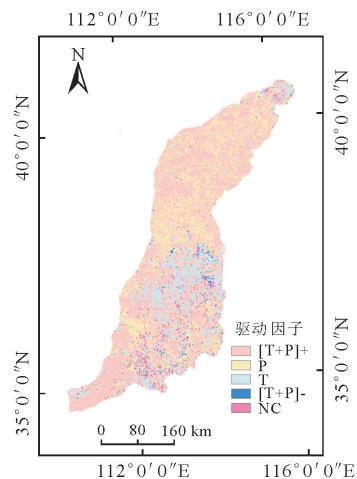


图 11 驱动因子分区

Fig. 11 Driving factor partition statistics

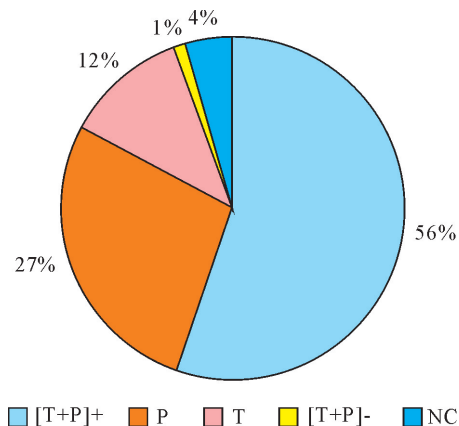


图 12 驱动因子分区饼图

Fig. 12 Driving factor partition pie chart

对结果进行联合统计分析可知,月均 NDVI 与同月气温不存在明显的相关性(图 13A)。月均 NDVI 与同期月均气温的相关系数是 0.355,其中显著性 $P > 0.05$ 的面积占总面积的 99.8%;而月均 NDVI 与前 1 个月的平均气温存在极显著的相关性(图 13B),月均 NDVI 与前 1 个月的平均气温的相关系数是 0.916,其显著性达到 0.01 的面积占总面积的 98.44%,显著性达到 0.05 的面积占总面积的 0.54%,只有太行山区的南部边缘区域(济源、孟州)和西南部分区域(临汾)显著性 $P > 0.05$,占总面积的 1.02%,未通过 0.05 显著性检验;月均 NDVI 与前 2 个月的气温的相关性较显著(图 13C),月均 NDVI 与前 2 个月的平均气温的相关系数是 -0.560,其中通过 0.01 显著性的区域面积占总面积的 10.05%,通过 0.05 显著性的区域面积占总面积的 47.76%,未通过 0.05 显著性检验的区域面积

占总面积的 42.19%。

综上可知,月均 NDVI 与前 1 个月的气温相关性最强,即太行山区月均 NDVI 对月均气温存在 1 个月的滞后性。

对结果进行联合统计分析可知,月均 NDVI 与同月累计降水存在明显的相关性(图 14A)。月均 NDVI 与同月累计降水的相关系数为 0.580,其中通过 0.01 显著性检验的面积占总体面积的 32.13%,通过 0.05 显著性检验的面积占总体面积的 28.81%,未通过 0.05 显著性检验的面积占总体面积的 39.06%;月均 NDVI 与前 1 个月累计降水不存

在明显的相关性(图 14B)。月均 NDVI 与前 1 个月累计降水的相关系数为 0.214,其中通过 0.01 显著性检验的面积占总体面积的 0.02%,通过 0.05 显著性检验的面积占总体面积的 0.71%,未通过 0.05 显著性检验的面积占总体面积的 99.27%;月均 NDVI 与前 2 个月累计降水存在极明显的相关性(图 12C)。月均 NDVI 与前 2 个月累计降水的相关系数为 0.853,其中通过 0.01 显著性检验的面积占总体面积的 94.89%,通过 0.05 显著性检验的面积占总体面积的 3.7%,未通过 0.05 显著性检验的面积占总体面积的 1.41%。

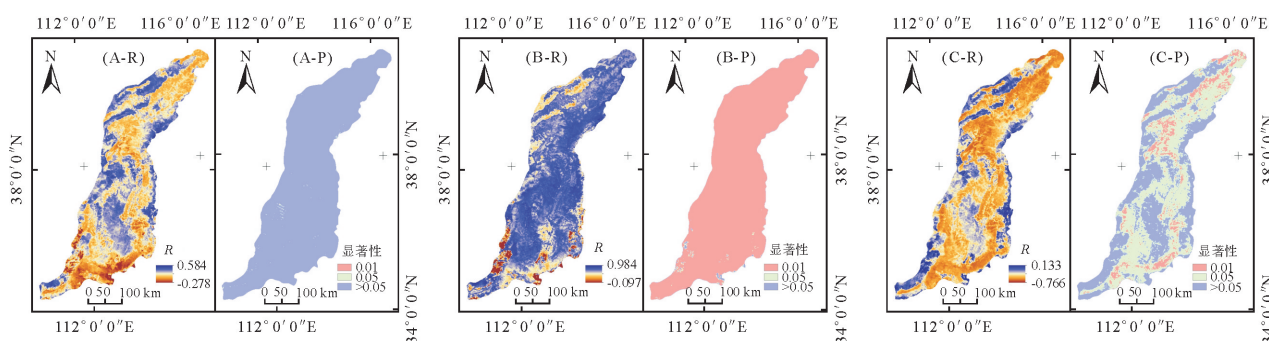


图 13 月均 NDVI 与不同时期气温的相关系数和显著性检验

Fig. 13 Correlation coefficient and significance test results of average NDVI and temperature in different periods

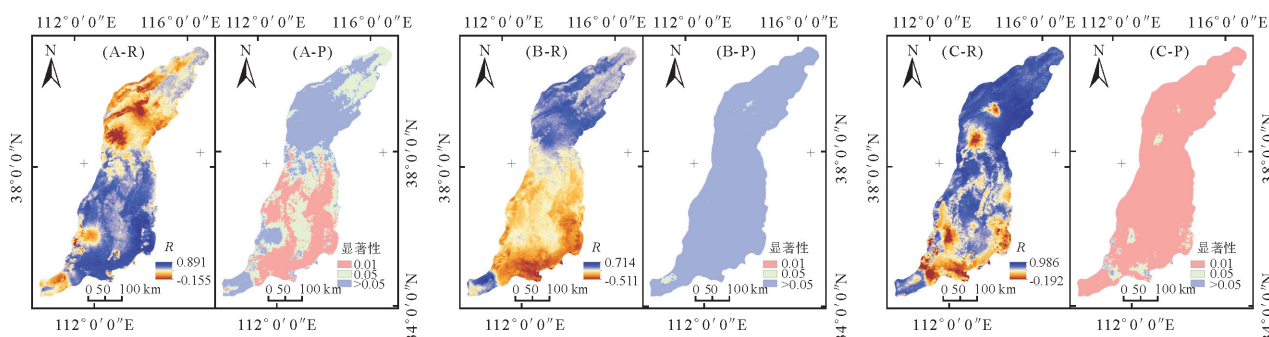


图 14 月均 NDVI 与不同时期降水的相关系数和显著性检验

Fig. 14 Correlation coefficient and significance test results of the average NDVI and precipitation in different periods

综上可知,月均 NDVI 与前 2 个月累计降水的相关性最强,即太行山区月均 NDVI 对月均累计降水存在 2 个月的滞后性。

3 结论与讨论

1)在时间尺度上,太行山区 NDVI 变化与时间关系显著,呈波浪式的增长趋势,从 1998 年的 0.67 增加到 2018 年的 0.78,平均增长速率为 0.03/10 a (线性增长率为 0.067/10 a),其中 $R^2 = 0.849$,通过 0.01 显著性,这说明太行山区 NDVI 的增长与时间相关性显著。这一结果与李新元等^[4]、李晓荣等^[12]的研究结果大体上一致,但由于研究时间跨度更大,增幅也相对较大,表明随着太行山区生态修复工作

以来,植被覆盖状况累年变好。

2)在空间尺度上,太行山区植被覆盖在空间分布上有明显的区域性差异,呈现出西北低、东南高、中部区域高低值交叉分布的特点。太行山区 93.46% 的区域面积呈现增加趋势,且集中在中高海拔地区,而低海拔地区 NDVI 呈现减少趋势,其主要原因是经济发展和人类活动的增加导致大量林地和耕地转向建设用地。

3)太行山区植被 NDVI 与气温在空间上呈现不显著负相关。其中,太行山区中部区域 NDVI 与气温呈负相关,西南、西北区域呈正相关;NDVI 与降水呈现显著正相关,整体上可以概括为从西北到东南相关系数逐渐变小。总体上看气温和降水等气

候因子会促进植被覆盖率的生长,保护太行山区的植被覆盖必须考虑气候因子的影响。

4)对 NDVI 变化驱动因子分区研究发现,气温和降水共同影响的区域占太行山总面积的 57%,且主要是低、中海拔区域;气温驱动型区域占太行山总面积的 12%,主要分布在太行山区的南部中、高海拔区域;降水驱动型区域占太行山总面积的 27%,主要分布在太行山区的北部,在海拔上没有显著的特征。非气候因子驱动型(NC)区域占太行山总面积的 4%,主要分布在太行山区南部低海拔区域。

在对太行山区进行生态环境保护和修复时,低海拔区域要重点关注人类活动的影响,控制太行山区植被受人类活动影响的范围区域,进行合理规范的利用;在中、高海拔区域,随着海拔的升高,降水量的增加以及气温的降低,影响植被生长的主要因素变为气温,所以要加大对气温的监控,有效预防严重自然灾害的发生。

5)对 NDVI 与气温、降水进行滞后性分析发现,太行山区 NDVI 与气温和降水有明显的时间滞后性关系,其中 NDVI 与气温的滞后性是 1 个月,与降水的滞后性是 2 个月。在进行太行山脉生态系统稳定性研究和太行山区生态环境治理与保护时,应充分考虑 NDVI 与气温和降水的滞后性关系。

参考文献:

- [1] 魏榕,刘翼,张特,等.雅砻江流域生长季植被时空变化特征及对气象因子的响应分析[J].生态环境学报,2021,30(3):512-522.
WEI R, LIU Y, ZHANG T, *et al.* Analysis of vegetation spatiotemporal variation characteristics and response to meteorological factors in the growing season in Yalong River basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(3): 512-522. (in Chinese)
- [2] 孟哈,黄远程,史晓亮.黄土高原地区 2001—2015 年植被覆盖变化及气候影响因子[J].西北林学院学报,2019,34(1):211-217.
MENG H, HUANG Y C, SHI X H, *et al.* Vegetation coverage change and climate impact factors in the Loess Plateau from 2001 to 2015 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 211-217. (in Chinese)
- [3] 徐光来,李爱娟,徐晓华,等.中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动[J].植物生态学报,2021,45(3):213-223.
XU G L, LI A J, XU X H, *et al.* NDVI dynamics and driving climatic factors in the protected zones for ecological functions in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(3): 213-223. (in Chinese)
- [4] 李新元,王莉,景海涛,等.2000—2015 年太行山地区 NDVI 变化及驱动因素分析[J].湖北农业科学,2020,59(9):70-76.
LI X Y, WANG L, JING H T, *et al.* Analysis of NDVI changes and driving factors in Taihang Mountain area from 2000 to 2015 [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(9): 70-76. (in Chinese)
- [5] 覃巧婷,陈建军,杨艳萍,等.黄河源区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 Q T, CHEN J J, YANG Y P, *et al.* Spatial and temporal 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. (in Chinese)
- [6] 饶品增,王义成,王芳.三江源植被覆盖区 NDVI 变化及影响因素分析[J].草地学报,2021,29(3):572-582.
RAO P Z, WANG Y C, WANG F, *et al.* Analysis on the NDVI change and influence factors of vegetation cover in the Three-River Headwaters region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(3): 572-582. (in Chinese)
- [7] 周梦甜,李军,朱康文.西北地区 NDVI 变化与气候因子的响应关系研究[J].水土保持研究,2015,22(3):182-187.
ZHOU M T, LI J, ZHU K W. Changes of NDVI in different regions of northwestern area and its responses to climate factor[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 182-187. (in Chinese)
- [8] MUNKHNASAN L, WOO-KYUN L, SEONG W J, *et al.* Long-term trend of and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data[J]. Methods X, 2018(5):803-807.
- [9] DAVENPORT M L, NICHOLSON S E. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in east Africa [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 12(14):2369-2389.
- [10] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].生态学报,2014,34(17):5007-5020.
YAN E P, LIN H, DANG Y F, *et al.* The spatiotemporal changes of vegetation cover in Beijing-Tianjin sandstorm source control region during 2000—2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 5007-5020. (in Chinese)
- [11] OGUNBODE C A, DORAN R, BÖHM G. Exposure to the IPCC special report on 1.5 °C global warming is linked to perceived threat and increased concern about climate change [J]. Climatic Change, 2020, 3(158):361-375.
- [12] 李晓荣,高会,韩立朴,等.太行山区植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析[J].中国生态农业学报,2017,25(4):498-508.
LI X R, GAO H, HAN L P, *et al.* Spatio-temporal variations in vegetation NPP and the driving factors in Taihang Mountain area [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 498-508. (in Chinese)
- [13] 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.
LI W, TAN M H. NDVI variation tendency under different slopes in Taihang Mountain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 509-519. (in Chinese)
- [14] 范松克.太行山南麓归一化植被指数变化及成因分析[D].郑州:河南理工大学,2019.

- tion and functional group classification of the dominant populations in shrub layer in secondary forest of *Pinus tabulaeformis* in Qinling mountain, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1736-1744. (in Chinese)
- [29] 尹林克, 李涛. 塔里木河中下游地区荒漠河岸林群落种间关系分析[J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 226-234.
- [30] 赵峰侠, 尹林克. 荒漠内陆河岸胡杨和多枝怪柳幼苗种群空间分布格局及种间关联性[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 972-977.
- [31] 何光熊, 闫帮国, 纪中华, 等. 元谋干热河谷 Savanna 草地优势植物的种间关系[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 62-71.
HE G X, YAN B G, JI Z H, *et al.* Interspecific relationship in Savanna grassland in Yuanmou, a dry-hot valley upstream of the Yangtze River[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(6): 62-71. (in Chinese)
- [32] 张锐, 李庆卫. 北京凤凰岭岩生植物优势种群种间关系[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(2): 167-174.
ZHANG R, LI Q W. Interspecific relationship among dominant rock plant species in Beijing phoenix hill[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 167-174. (in Chinese)
- [33] 徐高兴, 王立, 徐先英, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带地下水埋深对怪柳灌丛生长及物种多样性的影响[J]. 草原与草坪, 2017, 37(2): 49-56.
XU G X, WANG L, XU X Y, *et al.* Impact of groundwater level on growth and species diversity of *Tamarix ramosissima* community around oasis fringe in Minqin[J]. Grassland and Turf, 2017, 37(2): 49-56. (in Chinese)
- [34] 刘加珍, 陈亚宁, 张元明. 塔里木河中游植物种群在四种环境梯度上的生态位特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 549-555.
- [35] 刘锦霞, 武高林, 马涛. 毛乌素沙漠边缘荒漠植物群落生态位特征研究[J]. 草业科学, 2007, 24(12): 9-14.
- [36] 牛慧慧, 陈辉, 付阳, 等. 柴达木盆地东部荒漠植物生态位特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 1-9.
NIU H H, CHEN H, FU Y, *et al.* Ecological niche characteristics of desert plants in the eastern Qaidam Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 1-9. (in Chinese)
- [37] 贺山峰, 蒋德明, 李晓兰, 等. 小叶锦鸡儿固沙群落草本种群重要值与生态位的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(10): 150-155.
- [38] 霍红, 冯起, 苏永红, 等. 额济纳绿洲植物群落种间关系和生态位研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1027-1033.
HUO H, FENG Q, SU Y H, *et al.* Interspecies relationship and niche analysis on phytocoenosis in the Ejina Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1027-1033.

(上接第 9 页)

- [15] 薛朝浪, 赵宇鸾, 魏小芳, 等. 基于 CCA 的太行山区土地利用变化驱动机制分析[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(1): 93-103.
XUE C L, ZHAO Y L, WEI X F, *et al.* Analysis of driving mechanism of land-use change in Taihang Mountainous areas based on CCA[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2019, 37(1): 93-103. (in Chinese)
- [16] YING Z, CHAOBIN Z, ZHAOQI W, *et al.* Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source region, China from 1982 to 2012[J]. The Science of the Total Environment, 2016(563/564): 210-220.
- [17] 王鑫爽, 吴梦月, 马红利, 等. 渭河流域长时间序列 NPP 估算及时空变化特征分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 205-211.
WANG X S, WU M Y, MA H L, *et al.* Estimation and spatial-temporal dynamics of long time sequenced vegetation net primary productivity in the Weihe river basin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 205-211. (in Chinese)
- [18] YUAN J, XU Y, XIANG J, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its associated influence factor analysis in the Yangtze River Delta, eastern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(12): 32866-32879.
- [19] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1425-1435.
ZHANG J H, FENG Z M, JIANG L G, *et al.* Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9): 1425-1435. (in Chinese)
- [20] 余汛, 王莉, 景海涛, 等. 太行山区 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(16): 260-268.
- [21] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
MU S J, LI J L, ZHOU W, *et al.* Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3752-3764. (in Chinese)
- [22] LIU Z Z, WANG H, LI N, *et al.* Spatial and Temporal Characteristics and Driving Forces of Vegetation Changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018[J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2198.
- [23] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
CHEN Y H, LI X B, SHI P J. Climate-driven analysis of terrestrial NDVI changes in China from 1983 to 1992[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25(6): 716-720. (in Chinese)