

# 气候和人类活动对辽宁省植被变化的影响

路洁<sup>1</sup>, 王学风<sup>2</sup>, 曹永强<sup>1</sup>

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 中国水利水电科学研究院信息中心, 北京 100048)

**摘要:** 基于2000—2019年MODIS-NDVI和气温、降水等气象数据及大气环流指数等资料, 运用趋势分析、相关分析、通径分析和残差分析等方法对气候和人类活动影响下辽宁省植被动态演变特征进行探讨, 并结合趋势系数和Hurst指数的叠加分析植被未来变化趋势。结果表明: 辽宁省年均NDVI以0.004/a的速率增长, 总体植被状况良好; 空间上辽宁省植被覆盖程度主要以改善为主, 辽阳市与沈阳市一带有轻微退化现象; 辽宁省植被对降水的响应高于气温, 2000—2019年人类活动对辽宁省植被的影响由消极转变为积极; 辽宁省NDVI在反持续变化中, 退化面积占到总面积的55.24%, 表现为分散于整个区域的空间分布状况, 未来更应继续加强植被保育和退耕还林力度。

**关键词:** 人类活动; 植被变化; NDVI; 水热条件; 残差分析; Hurst指数; 辽宁省

中图分类号: Q948.112

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2022)04-0007-08

**Effects of climate and human activities on vegetation variation in Liaoning Province//**LU Jie<sup>1</sup>, WANG Xuefeng<sup>2</sup>, CAO Yongqiang<sup>1</sup> (1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Information Center, China Institute Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Based on the data of MODIS-NDVI, air temperature, precipitation and atmospheric circulation index from 2000 to 2019, the dynamic evolution characteristics of vegetation in Liaoning Province under the influence of climate and human activities were discussed by using trend analysis, correlation analysis, path analysis and residual analysis. Combined with the superposition of trend coefficient and Hurst index, the future change trend of vegetation was analyzed. The results show that the average annual NDVI increased at a rate of 0.004/a in Liaoning Province, and the overall vegetation status was good. Spatially, the vegetation coverage in Liaoning Province was mainly improved, with slight degradation in Liaoyang and Shenyang cities. The response of vegetation to precipitation in Liaoning Province was higher than that of air temperature, and the impact of human activities on vegetation in Liaoning Province changed from negative to positive from 2000 to 2019. In the reverse continuous change of NDVI in Liaoning Province, the degraded area accounts for 55.24% of the total area, which shows the spatial distribution of NDVI scattered in the whole region. In the future, the efforts of vegetation conservation and returning farmland to forest should be strengthened.

**Key words:** human activity; vegetation variation; NDVI; hydrothermal condition; residual analysis; Hurst index; Liaoning Province

近年来我国经济发展迅速, 人类对资源的过度开发利用导致了严峻的生态环境问题, 为确保国家经济社会的可持续发展, 提出要将生态文明建设放到与经济发展同等重要的位置上。植被作为地球表层生态系统的重要组分, 其生长发育和覆盖状况对揭示生态变化具有重要意义<sup>[1]</sup>。归一化植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI)具有区域覆盖广、时间序列长、应用广泛且实用性强的优点, 常用于反映地表植被发育状况及植被覆盖的时空演变特征<sup>[2]</sup>。气候是制约植被生长的重要条件,

植被对气候变化特别是水热状况的变化极其敏感<sup>[3]</sup>。除气候因子外, 短期内的植被覆盖变化则主要是人类活动积极或消极影响的结果, 且有研究表明, 人类活动影响的程度和变化速率逐渐超过自然因素<sup>[4]</sup>。因此, 在气候变化和人类活动双重作用下, 植被覆盖演变规律及其成因已成为国内外学者高度关注的科学热点之一。

当前, 国内外对地表植被的研究集中于进行区域尺度植被动态监测、探究植被与气候变化的互馈关系及引起植被变化的人为驱动机制等多个层面。

基金项目: 国家自然科学基金(52079060, 51779114); 辽宁省兴辽英才项目(XLYC2008033, XLYC2007111)

作者简介: 路洁(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 895232175@qq.com

通信作者: 曹永强(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

在植被动态监测方面,张成才等<sup>[5]</sup>利用遥感影像估算了伏牛山植被覆盖度并揭示其时空演变特征,提供了一种求取植被覆盖度的像元分解模型方法;刘宪锋等<sup>[6]</sup>对1982—2012年中国植被覆盖状况进行研究,结果表明,整体上我国植被呈缓慢增加趋势,但中高纬度山区植被存在下降趋势。在影响因素方面,研究表明引起植被变化的因素众多,包括气温、降水、日照等气候因子的变化<sup>[7-8]</sup>、下垫面类型及所处地理位置的不同<sup>[9-10]</sup>以及人类活动的影响<sup>[11-12]</sup>;当前气候变暖使海陆热力性质发生变化,影响大气环流及水循环,导致降水也出现区域差异<sup>[13]</sup>。此外,随着人类活动对自然干预程度的加深,众多学者发现人类活动对植被的影响也越来越显著,如生态工程建设会促进植被生长和发育,而城市建设、森林砍伐等会对植被生长产生抑制作用<sup>[14]</sup>。过去对人类活动影响的研究多采用定性评价,鉴于此,Archer<sup>[15]</sup>提出了一种定量分析方法——残差分析法,用实际NDVI与回归分析后预测值的差值对气候因素和人为因素进行分离。郭力宇等<sup>[16]</sup>以陕西省为研究区,探讨了气候变化与人类活动对植被覆盖的影响,结果表明植被覆盖对气候变化响应明显,人类活动影响力在持续增强。

目前针对东北地区和辽宁省NDVI的研究有很多,已有研究多分析了辽宁省植被覆盖变化及对气候因子的响应<sup>[17-22]</sup>,但针对人类活动对辽宁省植被影响的量化分析及未来植被生长的持续性特征方面还未做充分探讨。辽宁省作为振兴老工业基地国家战略的重要组成部分,社会经济的转型发展给区域生态环境带来深远影响。本文基于2000—2019年NDVI数据及逐日气象数据,采用趋势分析、相关分析和残差分析等方法定量揭示辽宁省植被变化及对水热条件和人类活动的响应,在此基础上运用趋势系数和Hurst指数法分析辽宁省植被的未来变化趋势,以期对辽宁省可持续发展、植被保护及生态恢复提供参考。

## 1 研究数据与方法

辽宁省位于中国东北的南部,地势呈东西高、中部低的格局,东西两侧为山地丘陵,中部为平原。境内雨热同期,夏季温和,冬季寒冷,年均降水量500~1000 mm,在季风气候影响下呈现辽西北地区降水少,干旱频发,东部山地降水多,中部降水适中,介于东西降水量之间的降水分布特征。年均气温7℃~11℃,东部沿海地区受海洋影响,日较差和年较差相对于内陆地区较小。辽东、辽西山地以林地为主,辽西南以草地为主,辽中由于地势平坦多为农

作区,以玉米、小麦为主<sup>[23]</sup>。

### 1.1 数据来源

选用2000—2019年辽宁省NDVI数据和气象数据,其中NDVI数据来源于美国国家航空航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>),空间分辨率为500 m;气象数据来源于中国气象数据网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),包括逐日平均气温和降水量观测数据。剔除数据不完整站点,最终选用记录完整的23个气象站,气象站空间分布如图1所示。环流因子包括多变量ENSO指数(MEI)、太平洋涛动(PDO)、北极涛动(AO)和北大西洋涛动(NAO),均来源于美国国家海洋和大气局(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei>),表征太阳黑子活动状况的太阳黑子相对数源于比利时皇家天文台数据中心(<http://www.sidc.be/silso/datafiles>),时间跨度为2000—2019年。

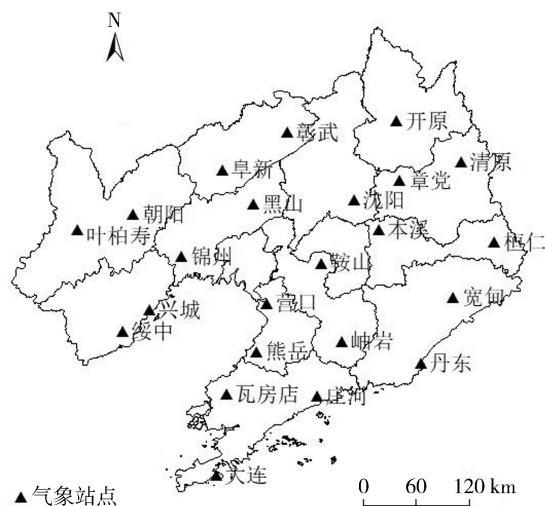


图1 辽宁省23个气象站点空间分布

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 NDVI影响因素分析

影响植被覆盖变化的因素主要包括气候因素和人为因素。气候因素分析中,主要采用相关分析法。相关分析法<sup>[24]</sup>可衡量两变量间的关系,相关系数的正负分别代表两因子呈正相关或负相关,绝对值越大越相关,反之则越不相关。本文通过逐栅格计算辽宁省2001—2019年NDVI与降水量、气温的相关系数,并进行 $P<0.05$ 的显著性水平检验。人类活动对植被的影响采用残差分析法<sup>[25]</sup>进行分析,残差值为正说明人类活动产生正效应,为负说明人类活动产生负效应,为零说明人类活动对植被产生较弱影响。大气环流对植被的影响采用通径分析方法<sup>[26]</sup>,通径分析可以估算某一大气环流因子对植被的直接影响,也可以估算某一大气环流因子通过其他因子对植被的间接影响。

### 1.2.2 Hurst 指数法

Hurst 指数法是基于重标极差 ( $R/S$ , 其中  $R$  为极差,  $S$  为标准差) 分析法得到的, 可以反映某一时间序列对之前信息的依赖性, 能够有效预测时间序列未来的发展趋势<sup>[27]</sup>。

考虑一个时间序列  $\{\xi_t\} (t = 1, 2, \dots, N)$ , 对于任意正整数  $\tau \geq 1$ , 定义均值序列:

$$\xi_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi_i \quad (1)$$

其累积离差、极差、标准差公式分别为

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi_u - \xi_\tau) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (2)$$

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\tau = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi_i - \xi_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\tau = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

Hurst 指数  $H$  可根据计算出的  $\tau$ 、 $R/S$  值, 在双对数坐标系 ( $\ln \tau, \ln R/S$ ) 中用最小二乘法拟合得到。当  $0.5 < H \leq 1$  时, 说明是一个持续性序列, 未来与过去变化趋势长期相关, 保持一致; 当  $0 \leq H < 0.5$  时, 说明该时间序列呈反持续性, 未来与过去变化趋势相反; 当  $H = 0.5$  时, 说明该序列为随机序列, 未来与过去趋势变化不相关, 未来变化趋势不确定。

## 2 结果与分析

### 2.1 辽宁省 NDVI 时空分布特征

#### 2.1.1 年际变化特征

由图 2(a) 可知, 总体上, 辽宁省年均 NDVI 以  $0.004/a$  的速率增长, 2004 年后植被覆盖率通过显著性检验, 持续增加, 20 a 平均 NDVI 为 0.788, 可见植被覆盖具有相对稳定性, 总体植被状况良好。2000—2019 年间, 植被覆盖程度最低的年份为 2000 年, 其次为 2002 年, 由图 2(b) 和图 2(c) 可以看出相比其他年份该时期辽宁省自然降水少, 温度较高, 蒸散较强, 由于省内出现严重干旱, 植被受灾严重<sup>[28]</sup>。之后辽宁省植被增长明显, 2005 年辽宁省开始实施了一系列生态文明建设工程, 例如“辽河流域防护林体系建设工程”“绿色通道工程”等, 随着生态工程、城市绿化等工作的不断开展, 植被覆盖逐渐好转<sup>[29]</sup>。

#### 2.1.2 空间变化特征

为了解辽宁省植被随时间变化的空间分布规律, 将 2004 年设为基准期, 对突变年份前后进行

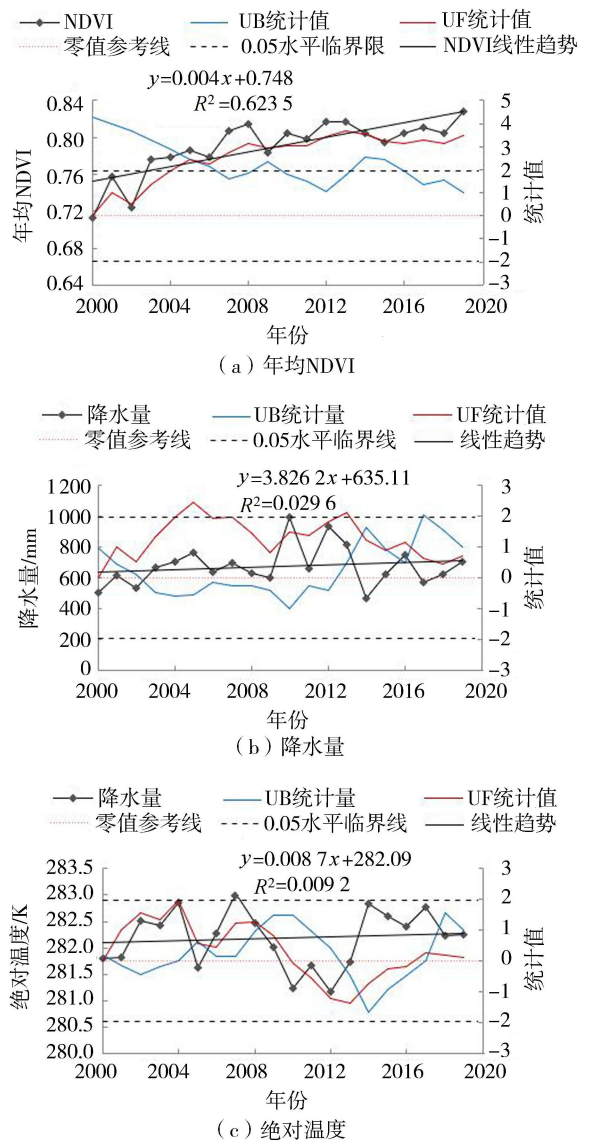


图 2 2000—2019 年辽宁省平均 NDVI、降水量和绝对温度的时间变化趋势

对比分析。由图 3 可知, 辽宁省 NDVI 突变前的平均 NDVI 介于  $0 \sim 0.88$  之间, 突变后的平均 NDVI 介于  $0.07 \sim 0.91$  之间, 与 2004 年前相比, 植被覆盖增加明显, 且有逐渐向西扩展的趋势, 说明辽宁省近年来的生态工程效果显著。其中 NDVI 在 2 个时间段的高值区都主要位于辽东山区, 包括抚顺、本溪、丹东、鞍山以及铁岭、辽阳、营口市东部, 除此之外, 辽西的朝阳、葫芦岛市西部植被覆盖也较好, 主要原因是辽宁省东部和西南部地区的植被多为落叶阔叶林与针阔混交林, 原始林地没有遭到破坏, 植被覆盖较好<sup>[20]</sup>。NDVI 较低值区主要零星分布于辽中的沈阳、锦州、盘锦, 辽西的朝阳、阜新、葫芦岛及辽南的大连, 植被覆盖度指数低于 0.6, 辽西北地区受蒙古高原冷空气影响, 降水量少, 水分匮乏、旱灾频发, 不利于



植被生长,此外沈阳、大连等地经济发达,城市扩张迅速,人类活动使森林遭到破坏,因此植被稀疏,与问青春等<sup>[30]</sup>的研究结果基本一致。

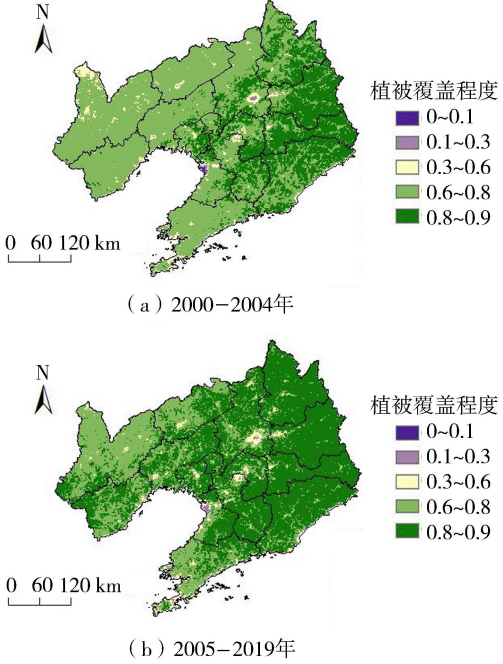


图3 辽宁省突变前后植被盖度的空间分布

2.2 气候对辽宁省 NDVI 的影响

为了探讨辽宁省植被演变与气候水热条件间的相关性,计算了像元尺度 NDVI 与多年平均降水量、气温的相关系数,结果见图4。由图4(a)可知,辽宁省大部分地区 NDVI 与降水呈正相关,其面积占总面积的 93.45%,辽宁省属于干旱半干

旱区,因此降水量越多越有利于植被生长,但阴雨天增加的同时也会导致太阳辐射减少,使植被光合作用减弱,所以在部分区域表现为负相关<sup>[20]</sup>。但整体来说相关性并不显著,这种区域差异是由辽宁省降水分布不均导致的。辽西地区靠近内陆,降水少,旱灾频发,因此降水量是影响植被生长的主导因素,进一步说明辽西植物长势变好与降水量的增多有关。

由图4(b)可知,NDVI 与气温呈正相关和负相关的面积分别占总面积的 55.89%和 44.11%。温度越高越有利于植被生长,但当温度超过一定阈值时会产生负面影响,因为气温升高同时也会增加植物和地表土壤水的蒸散发,使其水分流失、土壤干化得不到水分补充。从空间分布看,辽宁省中东部气温与 NDVI 以正相关为主,西部为负相关关系,辽宁省东部植被以落叶阔叶林与针阔混交林为主,辽西除林地外还有草地分布,中部平原以种植农作物为主,不同植被类型对气温的响应效果不同<sup>[29]</sup>。此外,温度对植被生长发育的影响是综合的,气温还可以通过影响光合、呼吸、蒸腾等代谢过程和有机物的合成和运输来影响植物的生长,或直接影响土温,通过水肥吸收和输导的不同来影响植物的生长,因此其相关性存在差异<sup>[31]</sup>。

对比每个栅格气温、降水与 NDVI 相关系数绝对值后,可以得到最值相关系数空间分布及对应的驱动因子(图5),用于分析植被对某一气候

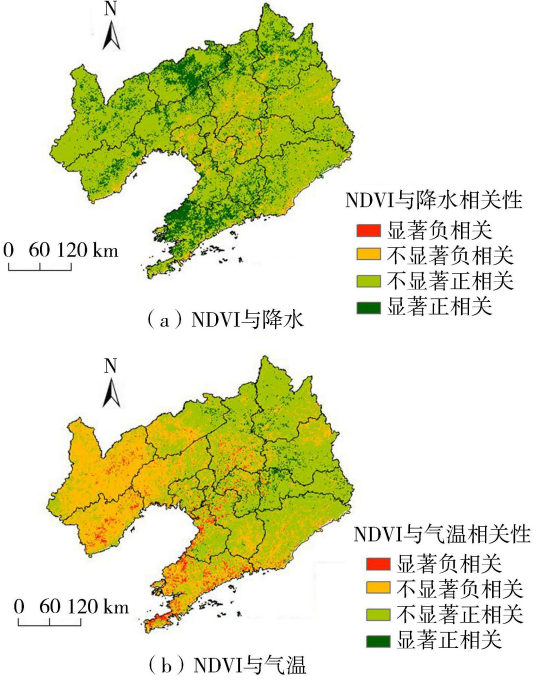


图4 2000—2019年辽宁省 NDVI 与降水、气温的相关关系

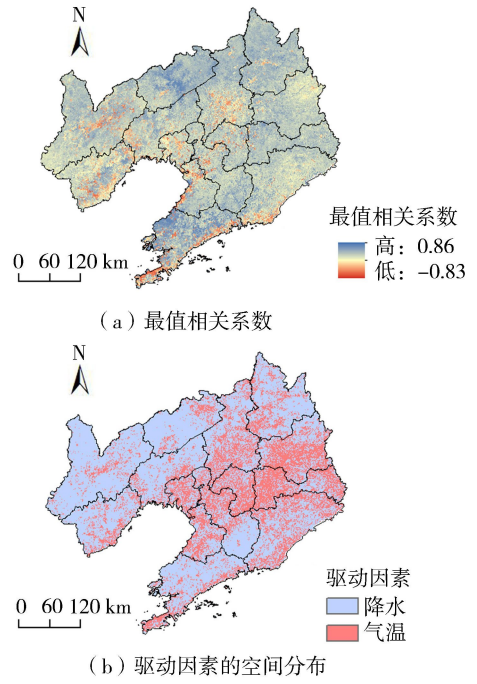


图5 2000—2019年辽宁省 NDVI 与降水、气温的最值相关系数及对应驱动因素的空间分布



因子响应的敏感程度。由图 5(a)可知,辽宁省对降水、气温的最值相关系数绝对值都很大,说明辽宁省 2000—2019 年植被受气候因子的影响都很大。结合图 5(b)可知,辽宁省植被受降水影响程度高于气温,其中 NDVI 变化受降水驱动的面积占总面积的 68.02%,主要分布于辽西和辽南地区,辽西地区远离海洋,且受蒙古高压影响,干旱频发,因此其生长对自然降水依赖性强,辽南植被类型属于草原,对降水要求也较高。而 NDVI 受气温驱动的面积占 31.98%,主要分布于辽中和辽东区域,该区域靠海,降水较多,水资源丰富,水分已经满足植被生长的要求,而且森林相比其他植被类型而言对气温要求较高<sup>[18]</sup>,充足的热量资源对植被产生促进作用,因此气温驱动力大于降水。

### 2.3 人类活动对辽宁省植被的影响及未来变化趋势分析

为响应国家生态文明建设的号召,辽宁省在 21 世纪初开始积极实施退耕还林工程,并推出《辽宁省污染防治与生态建设和保护攻坚行动计划(2017—2020 年)》,成效显著,人类活动对植被覆盖演化影响意义重大,因此,本研究对 NDVI 进行残差趋势分析,使其影响程度得以量化。由图 6 可知,近 20 a 辽宁省 NDVI 残差均值呈上升趋势,速率为 0.003 3/a,其残差值由负转正,2007 年前以消极作用为主,之后的大部分时间以积极作用为主,仅有 2010 年残差值为负,说明在 20 a 间人类活动对辽宁省植被的影响由消极转变为积极,且人类活动的影响在逐渐加强。

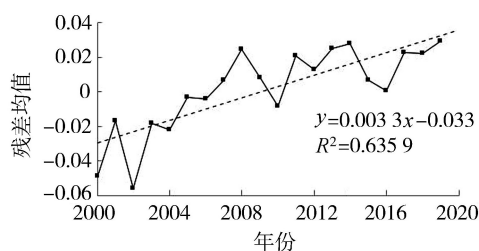


图 6 2000—2019 年辽宁省 NDVI 残差年际变化趋势

由图 7 可知,NDVI 残差趋势系数为负的区域面积占总面积的 12.48%,其中呈显著下降的面积仅为 3.66%,显著下降区域集中分布于辽中沈阳等城市周边,这些地区多属于城镇化水平比较高的区域,建设用地、交通用地等挤占了多数农田、绿地,因此表现为负效应。NDVI 残差趋势系数为正的区域的面积占总面积的 87.52%,显著上升区域集中分布于辽西大片区域,并在辽东也有零星分布,这些区域辽宁省政府先后实施了很多

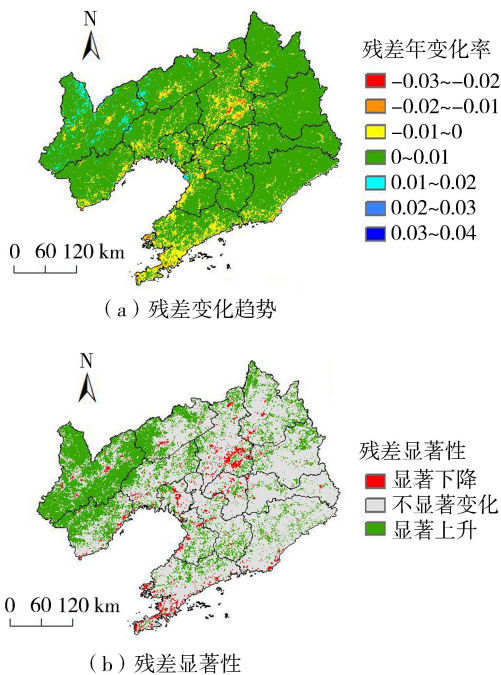


图 7 2000—2019 年辽宁省 NDVI 在人类变化影响下残差变化趋势及显著性

生态建设工程,从而扭转了当地降水少、干旱严重等气候方面的不足<sup>[29]</sup>。综上所述,人类活动对辽宁省 NDVI 的积极影响大于消极影响,今后在保持成效的同时还应加强生态工程建设,实现辽宁省可持续发展目标。

趋势系数可以用于反映在特定时间段内 NDVI 的变化趋势, $R/S$  分析可以用于揭示未来的植被变化是否与过去变化趋势保持一致,因此将趋势变化图和 Hurst 指数空间分布图进行叠加,得到两者耦合信息,可以达到合理预测未来植被变化趋势的目的。参考前人研究成果<sup>[32]</sup>,将趋势系数  $\theta_{slope} = 0$  作为植被改善和退化的标准,以 Hurst 指数  $H = 0.5$  作为判断 NDVI 变化是否继续向同一方向变化的标准。 $\theta_{slope} < 0, H < 0.5$  说明“由退化转为改善”,即 NDVI 在过去一直为下降趋势,但未来会有所改善; $\theta_{slope} > 0, H < 0.5$  说明“由改善转为退化”,即 NDVI 在过去一直在增加,但将来会退化; $\theta_{slope} < 0, H > 0.5$  说明“持续退化”,即未来 NDVI 变化与过去的退化趋势保持一致; $\theta_{slope} > 0, H > 0.5$  说明“持续改善”,即未来 NDVI 变化与过去的改善趋势保持一致。由图 8(a)可以看出,辽宁省 NDVI 的  $H > 0.5$  和  $H < 0.5$  的面积分别占总面积的 40.3% 和 59.70%,说明辽宁省 NDVI 未来变化的反持续性强于持续性。结合图 8(b)可知,在反持续变化中,退化面积远远大于改善面积,占到总面积的 55.24%,其退化表现为分散于

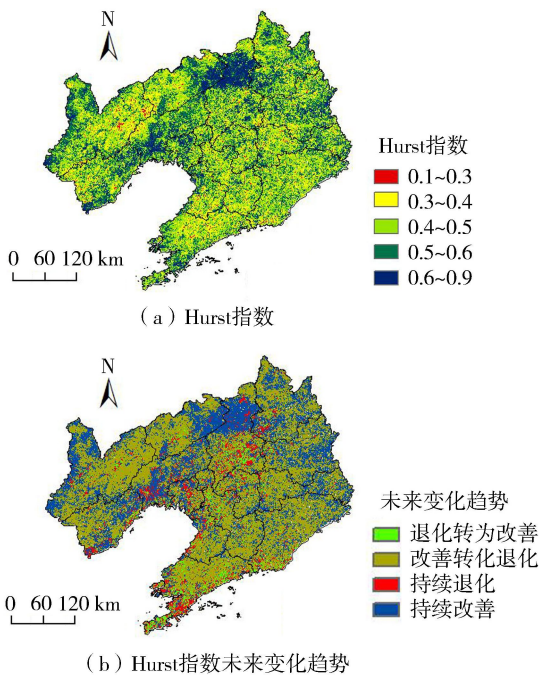


图8 辽宁省植被 Hurst 指数及未来变化趋势

整个区域的空间分布状况,说明在未来,我们更应该继续加强植被保育和退耕还林力度,尽量避免植被退化现象的出现。在持续性变化中,持续改善和持续退化的面积分别占总面积的 33.71% 和 6.59%,这些区域植被类型多属于林地,林地气候调节功能较强,植被变化的持续性也相对较强。其中持续改善的区域主要集中于辽北、辽东,辽西省界周围也有零星分布,可见这些地区实施的生态管理建设项目效果明显。

### 3 NDVI 对大气环流因子响应分析

植被动态演变及成因分析一直是目前生态建设和全球变化延伸出来的热点问题。在植被受气候因素影响过程中,本文仅仅考虑了植被对水热条件的响应,但辽宁省植被演变的成因机制是非常复杂的,除受单一气候因子变化影响外,还与极端气候及大气环流等因素有关<sup>[33-36]</sup>。通径分析可估算某一因子对因变量的直接影响和间接影响,因此,选取太阳黑子相对数、SPEI 指数及大气环流指数,包括多变

量 ENSO 指数 (MEI)、太平洋涛动指数 (PDO)、北极涛动指数 (AO) 和北大西洋涛动指数 (NAO),利用通径分析量化了各因子对辽宁省植被的影响程度,结果表明 (表 1),植被与太阳黑子相对数相关系数最大,相关系数达到  $-0.67$ ,由上文分析可知水热是影响植被生长的主要影响因子,而气温、降水等气候因子的变化主要取决于太阳黑子活动,相关性强;其次为干旱指数,呈显著正相关 ( $R=0.58, P<0.05$ ),干旱强度过强会影响植被的生长代谢,对植被生长产生抑制作用;而其他环流因子与植被的相关系数大小依次为 MEI、NAO、PDO、AO,虽然 4 个环流因子与 NDVI 的直接通径系数都很小,但通过太阳活动的间接通径系数都很大,说明太阳活动是影响植被生长的主要驱动因素。

综上分析各因子与 NDVI 相关系数发现,太阳黑子相对数和大气环流因子与 NDVI 指数呈负相关,干旱与 NDVI 呈正相关,其中 SPEI 和太阳黑子相对数与 NDVI 的直接通径系数分别达到 0.64 和  $-0.51$ ,通过 0.01 和 0.05 显著性检验,说明 SPEI 和太阳活动对 NDVI 的直接影响最大,而环流因子虽然直接作用小,但分析可知,大气环流主要通过太阳黑子间接影响植被生长,因此,各因子之间也存在相互影响的情况,并共同作用于植被生长。

## 4 结论

a. 辽宁省年均 NDVI 以 0.004/a 的速率增长,总体植被状况良好;2000—2019 年辽宁省植被覆盖呈轻微改善的范围较大,主要位于辽东和辽西北部地区;植被退化面积占比小,主要分布于辽中沈阳市、辽阳市及沿海一带,整体来看辽宁省生长季植被覆盖情况好转。

b. 气候因子变化是引起植被覆盖度变化的重要驱动因子,整体而言,辽宁省植被对降水的响应高于气温,受降水驱动的区域主要集中于辽西和辽南地区,受气温驱动的区域主要分布于辽中和辽东。

c. 从残差变化趋势图可以看出 20 a 间人类活动对辽宁省植被的影响由消极转变为积极,且人类

表 1 辽宁省植被与各影响因子的相关和通径系数

影响因子	与 NDVI 指数的 相关系数	与 NDVI 指数的 直接通径系数	与 NDVI 指数的间接通径系数					
			太阳黑子相对数	SPEI 指数	MEI	PDO	AO	NAO
太阳黑子相对数	-0.67**	-0.51*		-0.36	0.08	0.11	0.05	0.24
SPEI	0.58**	0.64**	-27.35**		-0.13	-0.25	-0.16	-0.51*
MEI	-0.28	-0.29	9.52**	-0.20		0.55**	-0.05	0.05
PDO	-0.19	0.29	9.02**	-0.26	0.38		-0.04	0.02
AO	-0.05	-0.14	8.80**	-0.34	-0.07	-0.09		0.66**
NAO	-0.23	0.50*	19.11**	-0.52*	0.03	0.02	0.32	

注: \* 代表通过 0.05 显著性水平检验, \*\* 代表通过 0.01 显著性水平检验。

活动的影响在逐渐加强;从 Hurst 指数可以看出辽宁省 NDVI 未来变化的反持续性强于持续性。在持续性变化中,持续改善的区域主要集中于辽北、辽东,辽西省界周围也有零星分布;在反持续变化中,辽宁省植被未来退化面积远远大于改善面积,退化区域分散于整个辽宁省。

## 参考文献:

[ 1 ] 韩先明,左德鹏,李佩君,等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 16-23. (in Chinese))

[ 2 ] REED B C. Trend analysis of time-series phenology of North America derived from satellite data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2006, 43(1): 24-38.

[ 3 ] 游宇驰,李志威,李希来. 1990—2011 年若尔盖高原土地覆盖变化[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 62-69. (YOU Yuchi, LI Zhiwei, LI Xilai. Land cover change in Zoige Plateau during 1990-2011 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 62-69. (in Chinese))

[ 4 ] 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. (JIN Kai, WANG Fei, HAN Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974. (in Chinese))

[ 5 ] 张成才,娄洋,李颖,等. 基于像元二分模型的伏牛山地区植被覆盖度变化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 301-307. (ZHANG Chengcai, LOU Yang, LI Ying, et al. Change of vegetation coverage in Funiu mountain regions based on the dimidiate pixel model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 301-307. (in Chinese))

[ 6 ] 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. (LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Spatial-temporal changes in vegetation coverage in China during 1982-2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5331-5342. (in Chinese))

[ 7 ] 杨倩,刘登峰,孟宪萌,等. 汉江上游植被指数变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 138-148. (YANG Qian, LIU Dengfeng, MENG Xianmeng, et al. Vegetation index change and its attribution analysis in the upper reach of Han River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4):

138-148. (in Chinese))

[ 8 ] 李镇,齐菲,尚国珩,等. 滹沱河流域植被覆盖时空演变及其与 SPEI 的相关关系[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 135-143. (LI Zhen, QI Fei, SHANG Guofei, et al. Spatial-temporal change of vegetation cover and its relationship with Spel in Hutuo river basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 135-143. (in Chinese))

[ 9 ] 付阳,陈辉,张斯琦,等. 基于群落类型的寒区旱区物候特征及其对气候因子的响应:以 2000—2019 年柴达木盆地为例[J]. 地理研究, 2021, 40(1): 52-66. (FU Yang, CHEN Hui, ZHANG Siqi, et al. Phenological characteristics of alpine arid region based on biome type and its responses to climate factors: a case study of Qaidam Basin from 2000 to 2019 [J]. Geographical Research, 2021, 40(1): 52-66. (in Chinese))

[ 10 ] 丁海勇,丁昕玮. 基于 SPOT\_NDVI 的甘肃省植被覆盖变化及其与气候、地形因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2665-2678. (DING Haiyong, DING Xinwei. Vegetation cover change and its responses to climate and topography in Gansu Province based on SPOT\_NDVI [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12): 2665-2678. (in Chinese))

[ 11 ] 杜佳梦,包刚,佟斯琴,等. 1982—2015 年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 1-13. (DU Jiameng, BAO Gang, TONG Siqin, et al. Variations in vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Mongolia during the period 1982-2015 [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 1-13. (in Chinese))

[ 12 ] 殷崎栋,柳彩霞,田野. 基于 MODIS NDVI 数据(2001—2018)的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响分析[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1-12. (YIN Qidong, LIU Caixia, TIAN Ye. Analysis of the temporal and spatial changes of vegetation greenness and the impact of human activities in Shaanxi Province based on MODIS NDVI data (2001-2018) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1-12. (in Chinese))

[ 13 ] WANG Y H, HE C, LI T. Impact of global warming on the western north pacific circulation anomaly during developing El Nino [J]. Journal of Climate, 2020, 33(6): 2333-2349.

[ 14 ] 周岩,刘世梁,谢苗苗,等. 人类活动干扰下区域植被动态变化:以西双版纳为例[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 565-574. (ZHOU Yan, LIU Shiliang, XIE Miaomiao, et al. Dynamics of regional vegetation changes under the disturbance of human activities: a case study of Xishuangbanna [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 565-574. (in Chinese))

[ 15 ] ARCHER E R M. Beyond the “climate versus grazing” impasse: using remote sensing to investigate the effects of



- grazing system choice on vegetation cover in the eastern Karoo[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(3): 381-408.
- [16] 郭力宇,李雨思,王涛,等. 气候变化与人类活动对植被覆盖的影响[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(1): 148-156. (GUO Liyu, LI Yusi, WANG Tao, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(1): 148-156. (in Chinese))
- [17] 薛梅,陈芸芝,闫敏,等. 中国东北地区植被 NPP 模拟与时空变化分析[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 821-830. (XUE Mei, CHEN Yunzhi, YAN Min, et al. Simulation and spatio-temporal variation analysis of net primary productivity in Northeast China [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(6): 821-830. (in Chinese))
- [18] 刘家福,马帅,李帅,等. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7647-7657. (LIU Jiafu, MA Shuai, LI Shuai, et al. Changes in vegetation NDVI from 1982 to 2016 and its responses to climate change in the black-soil area of Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7647-7657. (in Chinese))
- [19] 罗新兰,李英歌,殷红,等. 东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 412-421. (LUO Xinlan, LI Yingge, YIN Hong, et al. Response of NDVI to SPEI at different temporal scales in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 412-421. (in Chinese))
- [20] 张亮亮. 辽宁省植被动态演变及其气候驱动因子分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2017.
- [21] 王小霞,刘志华,焦珂伟. 2000—2017 年东北森林 NDVI 时空动态及其驱动因子[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(9): 2878-2886. (WANG Xiaoxia, LIU Zhihua, JIAO Kewei. Spatiotemporal dynamics of normalized difference vegetation index(NDVI) and its drivers in forested region of Northeast China during 2000-2017 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(9): 2878-2886. (in Chinese))
- [22] 王彦颖. 中国东北植被时空动态变化及其对气候响应研究[D]. 吉林: 东北师范大学, 2016.
- [23] 曹永强,齐静威,王菲,等. 辽宁省春玉米全育期的气候适宜度及年景评估[J]. *地理科学*, 2020, 40(7): 1210-1220. (CAO Yongqiang, QI Jingwei, WANG Fei, et al. Analysis of climate suitability of spring maize in Liaoning Province based on modulus and mathematics [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(7): 1210-1220. (in Chinese))
- [24] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,等. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 50-63. (LUO Min, GU-LI Gapal, GUO Hao, et al. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydrothermal condition in the Tarim River Basin from 2000 to 2013 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 50-63. (in Chinese))
- [25] 于璐,武志涛,杜自强,等. 气候变化背景下京津风沙源区人类活动对植被影响的量化分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2007-2014. (YU Lu, WU Zhitao, DU Ziqiang, et al. Quantitative analysis of the effects of human activities on vegetation in the Beijing-Tianjin sandstorm source region under the climate change [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2007-2014. (in Chinese))
- [26] 魏凤英. 现代气候统计与诊断技术(第 2 版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [27] WANG B, XU G C, LI P. Vegetation dynamics and their relationships with climatic factors in the Qinling Mountains of China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105719.
- [28] 王学风,路洁,曹永强. 辽宁省近 54 年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(12): 1514-1524. (WANG Xuefeng, LU Jie, CAO Yongqiang. Analysis of drought and flood characteristics in Liaoning Province and its response to atmospheric circulation in the last 54 years [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(12): 1514-1524. (in Chinese))
- [29] 曹永强,张亮亮,袁立婷. 辽宁省植被生长季 NDVI 对气候因子的响应[J]. *植物学报*, 2018, 53(1): 82-93. (CAO Yongqiang, ZHANG Liangliang, YUAN Liting. Correlation analysis of normalized difference vegetation index (NDVI) and climatic factors in the vegetative growing season in Liaoning Province [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2018, 53(1): 82-93. (in Chinese))
- [30] 问青春,张峥,王秋丽,等. 基于 MODIS 数据的辽宁省植被覆盖特征分析[J]. *环境保护与循环经济*, 2016, 36(5): 36-38. (WEN Qingchun, ZHANG Zheng, WANG Qiuli, et al. Analysis of vegetation coverage characteristics in Liaoning Province based on MODIS data [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2016, 36(5): 36-38. (in Chinese))
- [31] 王举凤. 内蒙古草原植被覆盖度对气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [32] TONG S Q, ZHANG J Q, BAO Y H, et al. Spatial and temporal variation of vegetation cover and its relationship with climate factors in Inner Mongolia based on GIMMS NDVI3g data [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(3): 394-407.
- [33] TONG Siqin, ZHANG Jiquan, BAO Yuhai, et al. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982-2013 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5): 595-610.

(下转第 38 页)

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 85-89. (in Chinese))
- [ 7 ] 黄健勇, 张飞珍, 张浩, 等. 斜式轴流泵装置进水流道的正交优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9): 741-746. (HUANG Jianyong, ZHANG Feizhen, ZHANG Hao, et al. Design optimization of inlet conduit in slanted axial-flow pump installation by orthogonal array experiment [ J ]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31 ( 9 ): 741-746. ( in Chinese ))
- [ 8 ] 刘君, 郑源, 周大庆, 等. 大型斜式轴流泵装置能量特性研究[J]. 流体机械, 2010, 38(1): 1-4. (LIU Jun, ZHENG Yuan, ZHOU Daqing, et al. Study on energy characteristics of large scale inclined axial-flow-pump arrangement[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(1): 1-4. (in Chinese))
- [ 9 ] 徐磊, 刘荣华, 陈伟, 等. 3种泵轴倾角斜式进水流道水力性能的比较[J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 128-132. (XU Lei, LIU Ronghua, CHEN Wei, et al. Comparison of hydraulic performance of three slanting inlet conduits with different angles of pump shaft[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(2): 128-132. (in Chinese))
- [ 10 ] 徐磊, 夏斌, 施伟, 等. 中隔墩长度对斜式轴伸泵装置出水流道水力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 74-81. (XU Lei, XIA Bin, SHI Wei, et al. Influence of middle pier lengths on hydraulic characteristic of outlet conduit in pump system with slanted extension shaft [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 ( 1 ): 74-81. ( in Chinese ))
- [ 11 ] 刘润根, 马晓忠, 詹磊. 黄家坝 30°斜式轴流泵装置模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 109-111. (LIU Rungen, MA Xiaozhong, ZHAN Lei. Model test study on 30° slanting axial-flow pump set of Huangjiaba[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016 (2): 109-111. (in Chinese))
- [ 12 ] 叶阳辉, 朱相源, 孙光普, 等. 离心泵内空泡演化与其对振动的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 88-93. (YE Yanghui, ZHU Xiangyuan, SUN Guangpu, et al. Evolution of cavitation bubbles and its influence on vibration in centrifugal pump [ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 88-93. ( in Chinese ))
- [ 13 ] 李忠, 杨敏官, 姬凯, 等. 轴流泵叶顶间隙空化流可视化实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(8): 1315-1318. (LI Zhong, YANG Minguan, JI Kai, et al. Visualization research on cavitating flow in tip clearance of axial-flow pump [ J ]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1315-1318. ( in Chinese ))
- [ 14 ] ZHANG Rui, CHEN Hongxun. Numerical analysis of cavitation within slanted axial-flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(5): 663-672.
- [ 15 ] 吴子娟, 侯聪, 梁武科, 等. 叶片安装角对轴流泵空化性能的影响[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020, 35(3): 277-284. (WU Zijuan, HOU Cong, LIANG Wuke, et al. Effect of blade installation angle on cavitation performance of axial flow pump [ J ]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(3): 277-284. ( in Chinese ))
- [ 16 ] 林鹏, 胡东, 吕云杰, 等. 含沙空化对轴流泵内流动特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 21-26. (LIN Peng, HU Dong, LYU Yunjie, et al. Effect of cavitation on flow characteristics in axial-flow pump under sand conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 21-26. (in Chinese))
- [ 17 ] 曹卫东, 张骞, 徐玉敏. 高速潜水轴流泵大流量工况的空化特性[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 55-61. (CAO Weidong, ZHANG Qian, XU Yumin. Cavitation characteristics of high-speed submersible axial-flow pump in high flow condition [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 ( 1 ): 55-61. ( in Chinese ))

(收稿日期: 2021-07-20 编辑: 俞云利)

(上接第 14 页)

- [ 34 ] 王晓利, 侯西勇. 1982—2014 年中国沿海地区归一化植被指数 (NDVI) 变化及其对极端气候的响应[J]. 地理研究, 2019, 38(4): 807-821. (WANG Xiaoli, HOU Xiyong. Variation of normalized difference vegetation index and its response to extreme climate in coastal China during 1982-2014 [ J ]. Geographical Research, 2019, 38 ( 4 ): 807-821. ( in Chinese ))
- [ 35 ] LHOTKA O, TMKS M, KYSELY J, et al. Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(18): 1-17.
- [ 36 ] 王璐, 黄生志, 黄强, 等. 基于综合干旱指数的黄河流域干旱多变量概率特征研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 70-80. (WANG Lu, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Drought multivariable probability characteristics based on a multivariate standardized drought index in the Yellow River Basin [ J ]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6): 70-80. ( in Chinese ))

(收稿日期: 2021-05-40 编辑: 刘晓艳)