DOI: 10.20103/j.stxb.202302220311

王祎宸, 贺洁, 何亮, 张宇洁, 张晓萍. 黄河流域 2001—2020 年植被物候及其对气候变化的响应. 生态学报, 2024, 44(2): 844-857.

Wang Y C, He J, He L, Zhang Y J, Zhang X P. Vegetation phenology and its response to climate change in the Yellow River Basin from 2001 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2);844-857.

黄河流域 2001—2020 年植被物候及其对气候变化的响应

王祎宸1,贺 洁1,何 亮1,张宇洁1,张晓萍1,2,*

- 1 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100
- 2 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100

摘要:植被周期性的物候更替被公认为是全球气候变化的综合指示器,深入研究区域植被物候的变化趋势和时空特征,可以提高对该区生态系统稳定性及动态变化程度的认识。基于 2001—2020 年 16 天、250m 分辨率的中分辨率成像光谱仪归—化植被指数(MODIS NDVI)数据,利用 Savitzky-Golay 滤波法(S-G) 和相对阈值法提取黄河流域植被物候参数,结合谷歌地球引擎(GEE)平台提供的欧洲中期天气预报中心第五代陆地再分析数据集(ERA5-LAND)小时气候再分析数据集和气候危害组红外降水站数据(CHIRPS)日降水数据集数据,运用趋势分析和偏相关分析等方法,探究全球气候变化下黄河流域不同植被分区物候参数空间分布特征、变化趋势,及其对气候因子的响应。结果表明:(1)2001—2020 年黄河流域气候整体呈暖湿化的发展趋势,年均温上升幅度为 0.15℃/10a(P>0.05),年降水增加幅度为 24mm/10a(P<0.05)。(2)黄河流域暖温带落叶阔叶林区域的生长季始期和中期最早,温带南部典型草原亚地带和温带南部荒漠草原亚地带最晚,温带灌木、禾草半荒漠亚地带的生长季结束期最晚,青藏高原高寒植被区域的生长季长度最短。(3)全流域内生长季始期和中期分别有 69.3%和 66.4%的面积呈提前趋势(P<0.05),生长季末期 50.9%的面积结束期呈推迟趋势(P<0.05),66.1%的面积整个生长季长度呈延长趋势(P<0.05)。(4)不同植被地带气候对物候参数影响存在差异,温度因子对带北部典型草原亚地带、高寒草原地带和高寒草甸地带的物候参数影响较大,降水和太阳辐射因子对温带南部典型草原亚地带、温带灌木、禾草半荒漠地带、温带南部荒漠草原亚地带和中亚热带常绿阔叶林地带的物候参数影响较大。

关键词:植被物候;气候变化;响应;黄河流域

Vegetation phenology and its response to climate change in the Yellow River Basin from 2001 to 2020

WANG Yichen¹, HE Jie¹, HE Liang¹, ZHANG Yujie¹, ZHANG Xiaoping^{1,2,*}

- 1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China
- 2 Institude of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Vegetation phenology is widely recognized as a comprehensive indicator of global climate change. Studying the spatiotemporal characteristics and trends of regional vegetation phenology can improve our understanding of the stability and dynamic changes of the ecosystem. Based on the 16day, 250m resolution MODIS NDVI data from 2001 to 2020, this study used the S-G filtering method and the relative threshold method to extract vegetation phenology parameters in the Yellow River Basin. Combined with the ERA5-LAND hourly climate reanalysis dataset and CHIRPS daily precipitation dataset provided by GEE platform, using trend analysis and partial correlation analysis methods, we explored the spatial distribution characteristics and change trends of vegetation phenology in different vegetation zones under global climate change. We also

基金项目:国家自然科学基金项目(41877083)

收稿日期:2023-02-22; 网络出版日期:2023-10-18

^{*} 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxp@ ms.iswc.ac.cn

analyzed its response to climate factors. The results show that: (1) the climate in the Yellow River Basin presented a warm and humid development trend from 2001 to 2020, with an annually average temperature increase of 0.15° C/10a (P > 0.05) and an annual precipitation increase of 24mm/10a (P < 0.05). (2) The warm temperate deciduous broad-leaved forest region in the Yellow River Basin had the earliest start of the growing season and middle time of the season, while the typical grassland subzone in the southern temperate zone and the desert grassland subzone in the southern temperate zone had the latest start of the growing season and middle time of the season. The end of the growing season in the temperate shrub-grass semi-desert zone was the latest, and the length of growing season in the alpine vegetation region on the Qinghai-Tibet Plateau was the shortest. (3) Within the whole basin, 69.3% and 66.4% of the area showed an advance trend (P < 0.05) for start of the growing season and middle time of the season, respectively, 50.9% of the area showed a delay trend (P < 0.05) for end of the growing season, and 66.1% of the area showed an extension trend (P < 0.05) for length of growing season. (4) There were differences in climate impacts on phenology parameters among different vegetation zones. Temperature had a greater impact on phenology parameters in typical grassland subzone in northern temperate zone, alpine grassland zone, and alpine meadow zone, while precipitation and solar radiation factors had a greater impact on phenology parameters in typical grassland subzone in southern temperate zone, temperate shrub-grass semi-desert zone, desert grassland subzone in southern temperate zone and mid-subtropical evergreen broad-leaved forest zone.

Key Words: vegetation phenology; climate change; response; the Yellow River Basin

植被是陆地生态系统的最重要组成部分之一^[1-3]。植被长期适应自然环境周期性变化,形成与此相适应的生长发育节律的现象被称为植被物候^[4]。植被物候是衡量生态系统动态及其对环境变化响应方式的重要生态参数,在生态系统水碳循环及平衡环节上是主要影响因素之一^[5-8]。例如,北半球 1980—2002 年期间生长季长度每延长一天,整个季节的植被总初级生产力会提高 0.5%—1.0%^[9-10]。同时,植被物候通过对大气中二氧化碳的控制、下垫面状况的改变,直接或间接影响区域小气候^[11]。因此,在全球气候变化的大背景下,深入研究植被物候可以提高对生态系统动态变化的认识。

随着科学技术的不断发展,遥感监测被越来越多地应用于植被地上物候监测中。利用遥感手段获取的数 据资源,可以进行大尺度且长时间序列的地上植被物候监测,有效地弥补了传统人工观测手段的局限 性[12-13]。谢宝妮等[14]基于高级甚高分辨率辐射计归一化植被指数(AVHRR NDVI)数据,研究了黄土高原 30a 植被物候特征及其与气温降水的响应关系。吉珍霞等[15] 基于中分辨率成像光谱仪归一化植被指数 (MODIS NDVI)数据对黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化关系进行了研究。植被物候对于外界 环境诸如气候因素、土壤条件、光周期的变化非常敏感[16-17]。而相同的因素在不同的区域对其影响程度存在 较大差异[18]。例如在热带地区,影响植被物候变化的气候因素很大程度上是降水而非太阳辐射,而在温带和 寒带地区,太阳辐射和温度对植被物候变化的影响力更强[19]。一般而言,气候因素对植被物候的影响存在一 定的累积效应因而显得滞后[20]。植物在枯黄期后进入休眠状态,只有积累到一定的热量打破休眠状态后才 会开启春季物候,因此早春的积温与植物生长季始期开始息息相关[21]。随着气候不断变化,相同区域植被物 候对气候因子的敏感性也会逐渐减弱[15,22]。除了气候因素外,土壤水分通过影响土壤温度从而影响植被物 候,但一般情况下其影响程度小于气候因素带来的影响[23]。2021年,据政府间气候变化专门委员会(IPCC) 第六次评估的结果,相较于前工业化前水平(1850—1900年),2010—2019年人类活动引起的全球表面温度 升高约 1.07° $^{\circ}$ $^{\circ}$ 。在全球气候变暖的大背景下,植被物候也将发生变化。植被物候的变化直接改变生长季 长度,进而影响生态系统的碳收支以及水、碳、养分等物质和能量循环[25]。目前,研究植被物候变化与气候因 子关系的研究较为丰富,但更多集中在对不同植被类型,如森林、灌丛和草地进行研究,对于区域尺度下植被 物候的地带性差异反映稍显不足,为此有必要进一步研究不同植被地带下物候的变化规律和影响因素。

黄河流域是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道,在中国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位^[26]。2022年10月通过了《中华人民共和国黄河保护法》,黄河流域的环境治理与生态恢复上升为重大国家战略。本研究基于全球气候变化的大背景,以黄河流域植被物候作为研究对象,先分析气候变

化,再结合不同的植被分区,基于 2001—2020 年 MODIS NDVI 数据提取物候参数,分析黄河流域不同植被分区植被物候变化趋势及其与气候因子的响应关系,旨在为黄河流域生态恢复提供一定理论依据和数据支撑。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

黄河流域位于中国北部(32°10′—41°50′N,95°53′—119°5′E),流经青海、四川、甘肃、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西、山西、河南和山东9省,流域总面积约79.5万km²。黄河干流发源于青海省巴颜喀拉山,在山东垦利县流入渤海。黄河流域地形呈现西部较高东部较低的态势,上游的河源地区平均海拔在4000m以上,温度较低且降水稀少;中游地区流经黄土高原,土壤侵蚀和水土流失现象较为严重;下游海拔在100m以下,主要由黄河冲积平原形成。由于流域内地貌类型多样,水热条件分布不均匀,所以流域内植被分布多样,黄河流域概况图如图1所示。

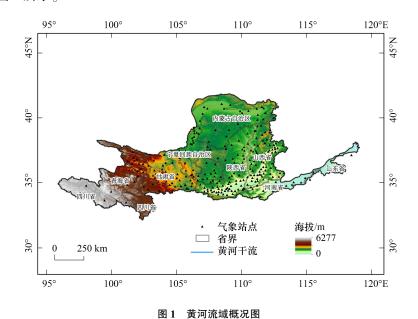


Fig.1 Map of Yellow River Basin

1.2 数据来源及预处理

本研究采用归一化差值植被指数(NDVI)提取植被物候。NDVI 数据源于谷歌地球引擎(GEE)(https://earthengine.google.com/)平台提供的空间分辨率 250m、16 天最大值合成的 MOD13Q1 V6.1 产品。该产品经过了大气校正的双向地表反射率计算,被广泛用于区域植被覆盖变化研究。将 NDVI 数据按照黄河流域矢量边界进行裁剪,黄河流域矢量边界数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)。

气候因子包括平均气温 (T_{mean}) 、最高气温 (T_{max}) 、最低气温 (T_{min}) 、地表净太阳辐射(NSSR)和降水(P)。温度、辐射数据来源于 GEE 平台提供的欧洲中期天气预报中心第五代陆地再分析数据集(ERA5-LAND)小时气候再分析数据集,按照均值和极值算法求日值,以日历月求均值和极值,然后进行裁剪,并统一重采样为250m的空间分辨率。降水数据来源于 GEE 平台提供的气候危害组红外降水站数据(CHIRPS)日降水数据集,按照日历月求降水总量。

为了确保结论的可靠性,对该数据集进行精度验证。选取覆盖黄河流域的 160 个气象站的实测数据,该数据来源于中国气象科学数据共享服务网。将气象站实测数据与本研究所选用数据集数据进行回归分析和方差检验,结果如图 2 所示。平均气温和最高温度的决定系数(R^2)达到了 0.972 和 0.913,相关性极显著(P< 0.01),均方根误差(RMSE)为 1.78 和 2.83,说明 ERA5—LAND 数据集可以很好地反映黄河流域气候的基本

状况。降水的决定系数为 0.765,相关性极显著(*P*<0.01),RMSE 为 22.07,表示 CHIRPS 数据集也可以较好地 反映该区域的降水情况。因此本研究所选用的两个数据集可以进行进一步的分析。

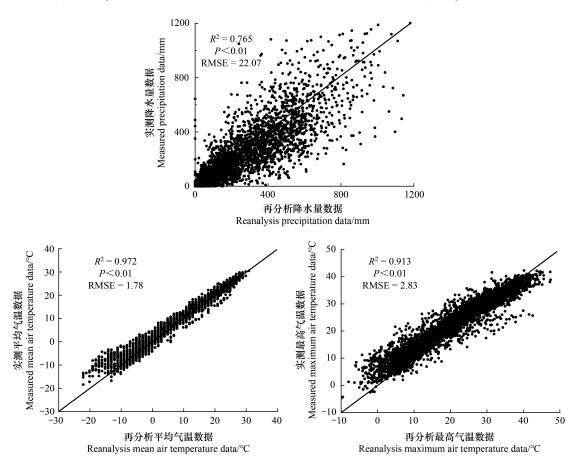


图 2 数据集精度验证结果 Fig.2 Data set accuracy validation results

RMSE: 均方根误差

植被区划数据和编码规则参考了《1:1000000 中国植被图集》 $^{[27]}$ 。根据划分,将黄河流域划分 5 个植被区域和 13 个植被地带,如表 1 和图 3 所示。

表 1 黄河流域植被划分
Table 1 Vegetation classification of the Yellow River Basin

植被区域	植被地带	代码	
Vegetational regions	Vegetational zones	Codes	
暖温带落叶阔叶林区域	暖温带北部落叶栎林地带	III i	
Warm temperate deciduous broadleaf forest region	暖温带南部落叶栎林地带	Ⅲ ii	
亚热带常绿阔叶林区域	北亚热带常绿、落叶混交林地带	IVA_i	
Subtropical evergreen broadleaf forest region	中亚热带常绿阔叶林亚地带	${ m IVA}_{ m iia}$	
温带草原区	温带南部森林(草甸)草原	$ m VIA_{iia}$	
Temperate grassland region	温带北部典型草原亚地带	$ m VIA_{ib}$	
	温带南部典型草原亚地带	$ m VIA_{iib}$	
	温带南部荒漠草原亚地带	$ m VIA_{iic}$	
温带荒漠区域	温带灌木、禾草半荒漠亚地带	$\mathrm{V\hspace{1em}I} B_{\mathrm{i}a}$	
Temperate desert region	温带灌木、半灌木荒漠亚地带	$\mathrm{V\hspace{1em}I\hspace{1em}I}\mathbf{B}_{\mathrm{ib}}$	
青藏高原高寒植被区域	高寒灌丛、草甸地带	$V\! I\! I\! I A_i$	
Alpine vegetation region on the Tibetan Plateau	高寒草甸地带	VIII A ii	
	高寒草原地带	$\mathbb{VII}\mathbf{B}_{\mathrm{i}}$	

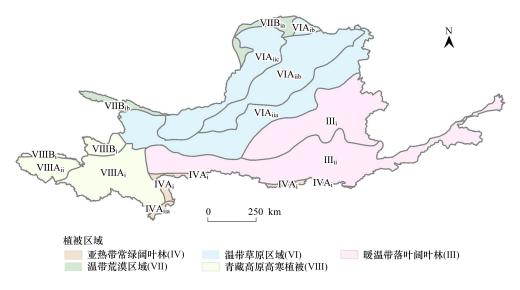


图 3 植被区域与地带空间位置

Fig.3 Vegetational region and zone spatial location

Ⅲ;:暖温带北部落叶栎林地带;Ⅲ;;暖温带南部落叶栎林地带;ⅣA;:北亚热带常绿、落叶混交林地带;ⅣA;ia:中亚热带常绿阔叶林亚地带; ⅥA;ia:温带南部森林(草甸)草原;ⅥA;b:温带北部典型草原亚地带;ⅦA;ib:温带南部典型草原亚地带;ⅦA;ic:温带南部荒漠草原亚地带;ⅧBia:温带灌木、禾草半荒漠亚地带;ⅧBib:温带灌木、半灌木荒漠亚地带;ⅧAi:高寒灌丛、草甸地带;ⅧAii:高寒草甸地带;ⅧBi;高寒草原地带

2 研究方法

2.1 NDVI 平滑处理与物候提取

受云和气溶胶等大气效应、传感器性能和观测条件差异等的干扰,卫星传感器获取的 NDVI 时间序列含有明显的噪声,需要采用平滑方法对 NDVI 进行预处理和重构。由于 Savitzky-Golay 滤波法(S-G) 在消除噪声的同时还能最大程度保留原始的信号形状和宽度不变,被广泛应用于数据平滑去噪^[28]。本研究采用了 S-G滤波法进行 NDVI 数据预处理和重构。

目前,阈值法和变化检测法是植被物候遥感提取的典型算法^[29]。由于黄河流域存在较大的植被空间异质性,所以选择误差相对较小的相对阈值法进行物候提取。相对阈值法属于动态阈值法的一种,临界值为相对某一恒定参量的比率变量而非恒定常量,能够消除背景值的影响,在不同像元和不同年份之间具有更加稳定的物理意义,反映不同时空条件下的同种植被生长阶段^[30]。因此本研究采用相对阈值法对该区域植被物候进行提取,根据前人研究成果和多次试验,将阈值定为 0.5^[31]。提取四个物候参数:生长季始期(SOS)、生长季中期(MOS)、生长季末期(EOS)和生长季长度(LOS)。本研究以日序(DOY)来表示物候发生的时间。

2.2 趋势分析

趋势分析选择一元线性回归趋势分析方法,该方法是对一组随时间变化的变量进行回归分析,可以预测变量的变化趋势^[32]。采用 *t* 检验法对一元线性回归法进行检验^[33]:

$$t = \frac{\hat{b}}{\hat{\sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} - t_{1-\alpha}(n-2)$$
 (1)

式中, \hat{b} 为通过一元趋势分析得到的斜率(slope);n 代表总年数; $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}$,其中 y_i 代表第 i 年的物候参数值, \hat{y}_i 代表第 i 年的物候参数回归值; x_i 代表第 i 年;P 表示显著性水平。当 P 小于 0.01 和 0.05 时,分别表示趋势通过了信度为 99% 和 95%的显著性检验。

本研究将变化趋势划分为 6 类: 不显著提前/缩短(slope<0,P>0.05)、显著提前/缩短(slope<0,0.05>P>0.01)、极显著提前/缩短(slope<0,P<0.01)、不显著推迟/延长(slope>0,P>0.05)、显著推迟/延长(slope>0,P>0.05),和极显著推迟/延长(slope<0,P<0.01)。

2.3 偏相关分析

偏相关分析是在多要素构成的自然系统中,控制其他变量不变,衡量某两个变量间线性关系的密切程度, 以偏相关系数来度量^[34]。偏相关计算公式如下:

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

式中, $r_{xy\times z}$ 为变量 z 固定后变量 x 和 y 的偏相关系数,即 xy 相关中剔除 z 的影响; r_{xy} 为变量 x 与变量 y 的相关系数; r_{xz} 为变量 x 与变量 z 的相关系数; r_{yz} 为变量 z 的相关系数。

通过 t 检验方法完成偏相关系数的显著性检验,计算公式如下:

$$t = \frac{r_{xy \times z}}{\sqrt{1 - r_{xy \times z^2}}} \sqrt{n - m - 1} \tag{3}$$

式中,n 为总年数,m 为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 黄河流域气候变化特征

黄河流域 2001—2020 年均温及降水空间分布如图 4 所示。年平均温度为 4.85℃, 年平均降水量为 493.19mm。自北向南随着纬度的降低,自西向东随着海拔的降低,年平均温度逐渐升高,年平均降水逐渐增加,变化范围分别为-10.6—14.2℃、109.3—1312.1mm。整体上在空间上表现为黄河上游高海拔地区寒冷干燥,中游到下游地区温暖湿润。

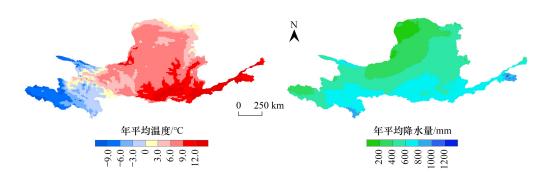


图 4 黄河流域 2001—2020 年平均温度与降水空间分布

Fig.4 Spatial distribution of mean temperature and precipitation in the Yellow River Basin from 2001 to 2020

图 5 表示了黄河流域近 20a 均温与降水变化率的空间分布特征,年均温变化范围为-0.78℃/10a—0.81℃/10a,变化率为 0.15℃/10a(*P*>0.05),年降水量变化范围为-24mm/10a—85mm/10a,变化率为 24 mm/10 a(*P*<0.05)。空间角度而言,黄河中游及下游沿岸年均温上升较多,普遍在 0.26℃/10a 以上,而黄河上游的高海拔地区年均温呈现下降趋势。年降水量整体呈现增加趋势,其中山西省西部,陕西省中部年降水量增加较多,在 44mm/10a 以上。黄河流域整体气候呈暖湿化的发展趋势。

3.2 黄河流域植被物候分布特征

2001—2020 年黄河流域植被物候空间分布如图 6 所示,采用相等间隔法对物候事件发生时间进行分类。随着海拔升高和纬度上升,SOS 逐渐推迟。流域中 25.21%和 39.36%面积的植被 SOS 分别发生在一年中的第

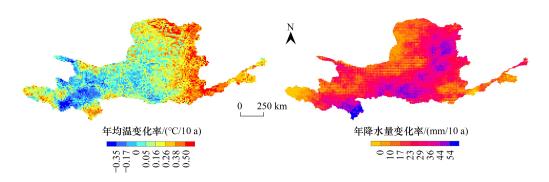


图 5 黄河流域 2001—2020 年均温与降水变化率及显著性检验

Fig. 5 The rate and the significance test of change of mean temperature and precipitation in the Yellow River basin from 2001 to 2020

120—140 天和第 140—160 天,在空间上主要分布在黄土高原的中部和甘肃南部。有 6.04%面积的植被 SOS 于一年中的第 100 天前开始,它们出现在黄土高原南部的关中平原与黄河下游一带的平原地区。MOS 与 SOS 的空间分布规律大致相同,MOS 发生在一年中的第 210—220 天面积占比最大,为 32.79%。黄河流域下游、关中平原和子午岭的 MOS 较早,黄土高原大部分地区 MOS 较晚。EOS 主要发生在一年中的第 270 天之前、第 270—280 天和第 280—290 天,面积占比分别为 21.06%、29.51%和 32.30%。但 EOS 的空间分布与 SOS 和 MOS 相比有所不同,黄土高原西南部分地区与宁夏回族自治区 EOS 较晚,普遍在第 300 天之后,而黄河上游、宁夏回族自治区和黄河下游的平原区 EOS 较早,普遍在第 270 天。在 SOS 与 EOS 的相互影响下,LOS 为 110d 的面积占比最大。空间上黄土高原南部,黄河下游部分地区,宁夏回族自治区的 LOS 较长,黄河流域中上游大部分区域 LOS 在 110d 左右,持续时间较短。

不同植被分区的植被物候参数如图 7 所示。暖温带落叶阔叶林区域(Ⅲ₁和Ⅲ₁₁)的 SOS 主要为第 103—150 天,其中暖温带南部落叶栎林地带是所有植被地带中 SOS 发生最早的,为第 60 天,MOS 主要为第 193—221 天,暖温带南部落叶栎林地带同样为所有植被地带中 MOS 发生最早的,为第 165 天,EOS 主要为第 273—291 天,LOS 主要为 156d。在亚热带常绿阔叶林区域(ⅣA_i和IVA_{iia})中,SOS 主要为第 114—137 天,MOS 主要为第 194—211 天,EOS 主要为第 273—285 天,LOS 主要为 145d。在温带草原区域(ⅥA_{iia}、ⅥA_{ib}、ⅥA_{ib}, NIA_{ib}, NIA_{ib},

3.3 黄河流域植被物候时间变化趋势

基于一元线性趋势分析,按照不同的植被分区统计各物候参数的平均变化天数(表 2)。SOS 中除了温带南部森林(草甸)草原、温带南部典型草原亚地带、温带南部荒漠草原亚地带和温带灌木、禾草半荒漠亚地带的 SOS 呈现推迟趋势,分别为 0.01d/a(P>0.05)、0.17d/a(P>0.05)、0.62d/a(P>0.05)和 0.40d/a(P>0.05),其余地带均呈现提前趋势,提前最多的是高寒草甸地带,为 0.65d/a(P<0.05)。MOS 各地带变化趋势中除北亚热带常绿、落叶混交林地带和中亚热带常绿阔叶林亚地带呈现与 SOS 相同地带相反的变化趋势以外,为推迟 0.02d/a(P>0.05),其余植被地带变化趋势与 SOS 相同,其中提前最多的地带为暖温带北部落叶栎林地带,为 0.49d/a(P<0.05),推迟最多的地带为温带南部荒漠草原亚地带,为 0.26d/a(P>0.05)。EOS 中,暖温带北部落叶栎林地带、暖温带南部落叶栎林地带、温带北部典型草原亚地带、温带南部南型草原亚地带、温带南部荒

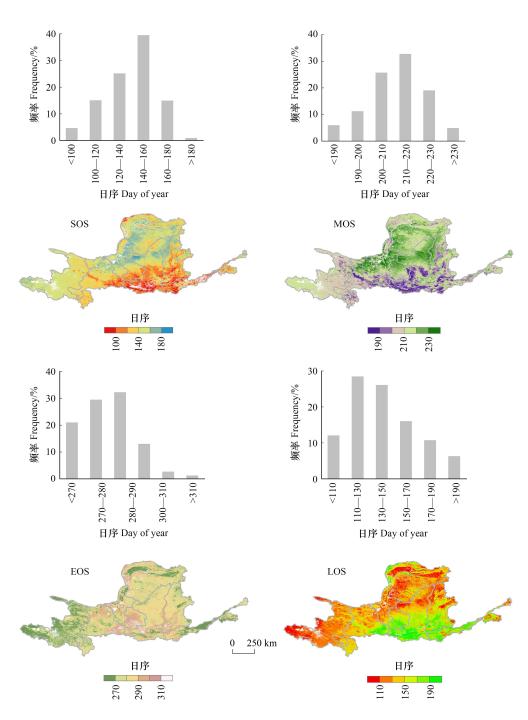


图 6 2001—2020 年黄河流域物候参数多年平均

Fig.6 Annual average of phenological parameters in the Yellow River Basin from 2001 to 2020 SOS;生长季始期;MOS;生长季中期;EOS;生长季末期;LOS;生长季长度

漠草原亚地带和温带灌木、禾草半荒漠亚地带表现为推迟趋势,推迟最多的为温带灌木、半灌木荒漠亚地带,为 0.28d/a(P>0.05),其余地带均表现为提前趋势,提前最多的为暖温带北部落叶栎林地带,为 0.29d/a(P>0.05)。温带南部典型草原亚地带、温带南部荒漠草原亚地带和温带灌木、禾草半荒漠亚地带的 LOS 分别缩短 0.26d/a(P>0.05)、0.69d/a(P>0.05)和 0.74d/a(P>0.05),其他地带为延长趋势,延长最多的地带为高寒草甸地带,为 0.81d/a(P<0.05)。

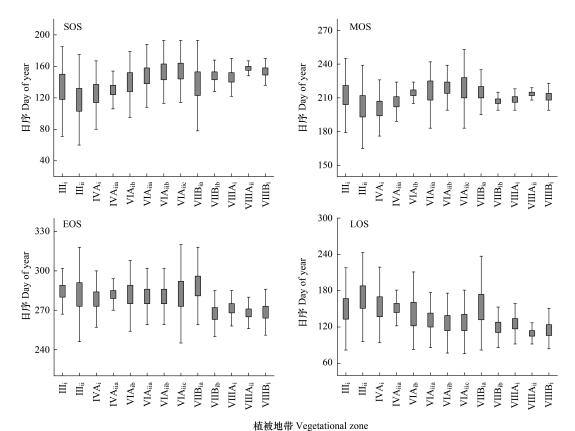


图 7 不同植被分区物候参数分布

Fig.7 Phenological parameter distribution in different vegetation zones

表 2 不同植被分区物候参数时间变化及显著性检验

Table 2 Temporal variation of phenological parameters in different vegetation zones and test of significance

地带 Vegetation zones	SOS/(d/a)	MOS/(d/a)	EOS/(d/a)	LOS/(d/a)
暖温带北部落叶栎林地带	-0.62*	-0.49 *	-0.29	0.35 *
Deciduous oak forest zone in the northern part of the warm temperate zone	-0.62	-0.49	-0.29	0.35
暖温带南部落叶栎林地带	-0.38*	-0.27 *	-0.07	0.33 *
Deciduous oak forest zone in the southern part of the warm temperate zone				
北亚热带常绿、落叶混交林地带	-0.31	0.02	0.18	0.49
Evergreen and deciduous mixed forest zone in the north subtropical zone				
中亚热带常绿阔叶林亚地带	-0.31	0.02	0.20	0.52
Evergreen broad-leaved forest subzone in the middle subtropical zone				
温带南部森林(草甸)草原	0.01	0.13	0.15	0.15
Forest (meadow) grassland in the southern part of the temperate zone				
温带北部典型草原亚地带	-0.15	-0.08	-0.02	0.13
Typical grassland subzone in the northern part of the temperate zone				
温带南部典型草原亚地带	0.17	0.10	-0.08	-0.26
Typical grassland subzone in the southern part of the temperate zone				
温带南部荒漠草原亚地带	0.62	0.26	-0.02	-0.69
Desert grassland subzone in the southern part of the temperate zone				
温带灌木、禾草半荒漠亚地带	0.40	0.14	-0.25	-0.74
Shrub and grass semi-desert subzone in the temperate zone				
温带灌木、半灌木荒漠亚地带	-0.35 *	-0.08	0.28	0.62 *
Shrub and semi-shrub desert subzone in the temperate zone				
高寒灌丛、草甸地带 Alpine shrub and meadow zone	-0.39	-0.09	0.24	0.63 *
高寒草甸地带 Alpine meadow zone	-0.65 *	-0.32 *	0.17	0.81 *
高寒草原地带 Alpine grassland zone	-0.56 *	-0.28	0.05	0.60 *

SOS:生长季始期 Start of the growing season; MOS:生长季中期 Middle time of the season; EOS:生长季末期 End of the growing season; LOS:生长季长度 Length of growing season; * P<0.05

图 8 表示黄河流域植被物候的变化趋势与显著性空间分布,SOS 呈现提前趋势的面积占总面积的 69.3% (P<0.05),主要分布在黄土高原中部、黄河下游平原和甘南、四川和青海地区。MOS 在空间上的变化趋势分布与 SOS 类似,呈现提前趋势的面积占总面积的 66.4% (P<0.05)。EOS 呈现提前和推迟趋势的面积分别占49.1% (P<0.05)和 50.9% (P<0.05),推迟的区域主要分布在黄河流域的甘肃、四川、青海、山东省及陕西省部分。LOS 大部分区域为延长趋势,占到总面积的 66.1% (P<0.05),主要分布在黄土高原中部,黄河流域中甘肃、四川、青海、山东、河南、山西省的大部分区域。

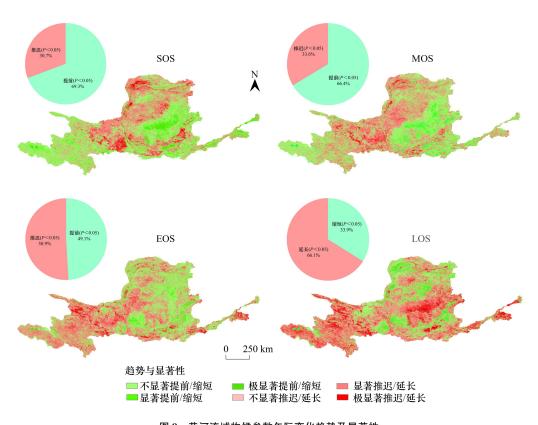


图 8 黄河流域物候参数年际变化趋势及显著性

Fig.8 Interannual trends and significance of phenological parameters in the Yellow River Basin

3.4 黄河流域植被物候变化对气候因子的响应

通过偏相关分析计算黄河流域各植被分区 2001—2020 年各物候参数与对应生长期时段的气候因子的偏相关系数空间分布(图 9)。黄河流域各植被分区 2001—2020 年各物候参数与对应生长期时段的气候因子之间存在一定的相关性,但这种相关性在不同植被分区中有所差异。T_{mean}对 EOS 呈显著正相关面积占比最大(54.2%),对 LOS 呈显著负相关面积最大(59.8%),说明平均温度越高,EOS 越早,LOS 越短,这种规律在温带北部典型草原等多个植被地带中较为明显。T_{max}对 MOS 呈显著正相关面积最大(56.8%),对 LOS 呈显著负相关面积最大(51.2%)。在温带北部典型草原等多个植被地带中这一特征较为明显。T_{min}对 LOS 呈显著正相关面积最大(51.2%)。在温带北部典型草原等多个植被地带中这一特征较为明显。T_{min}对 LOS 呈显著正相关面积最大(52.0%),对 SOS 呈显著负相关面积最大(61.6%)。这种规律主要体现在温带灌木等多个植被地带。P 对 EOS 呈显著正相关面积最大(69.3%),对 SOS 呈显著负相关面积最大(65.8%)。说明降水越多,SOS 和 EOS 越晚。这种规律在温带南部典型草原等多个植被地带中较为明显。地表净太阳辐射对 SOS 呈显著正相关面积最大(66.7%),对 EOS 呈显著负相关面积最大(72.3%)。说明太阳辐射越强,SOS 越晚,EOS 越早。这种规律在中亚热带常绿阔叶林等多个植被地带中较为明显。多数植被地带温度因子对物候参数的影响比降水和太阳辐射因子更大,如温带北部典型草原亚地带、高寒草原地带和高寒草甸地带中 SOS、MOS、EOS 和 LOS 对温度的影响大于降水和太阳辐射。而受到降水影响大的植被地带是温带南部典型草原亚地带

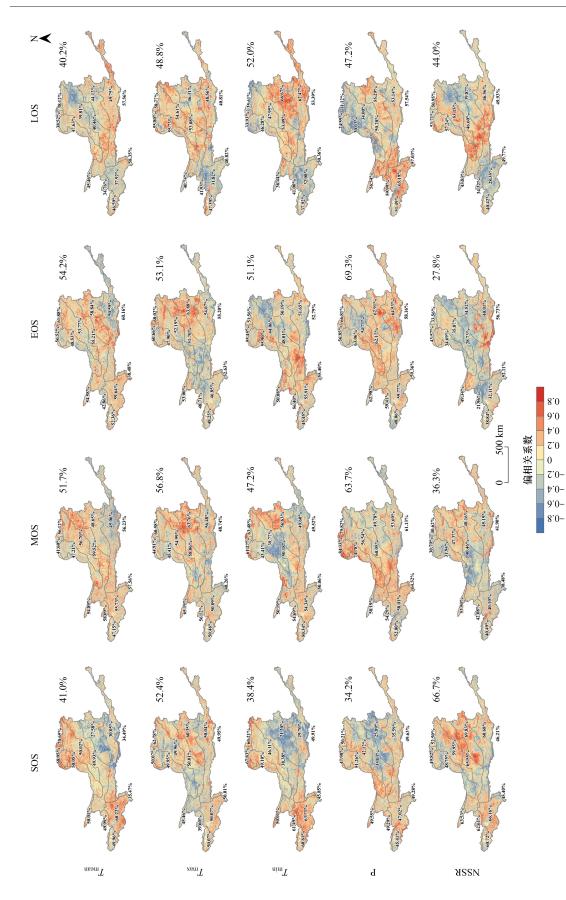


Fig.9 Bias correlation coefficients between phenological parameters and meteorological factors for different vegetation zones in the Yellow River Basin 图 9 黄河流域不同植被分区物候参数与气候因子的偏相关系数

Tucan:平均气温;Tuax:最高气温;Tun:最低气温;P:降水;NSSR:净地表太阳辐射;主图分区代码旁百分比为该分区偏相关系数大于0的像元占比, 右上角百分比为去除未通过P<0.05显著性检验的像元后偏相关系数大于0的像元占比。

和温带灌木、禾草半荒漠地带。太阳辐射影响大的植被地带是温带南部荒漠草原亚地带和中亚热带常绿阔叶林地带。这些地带的植被可能有一些特殊的适应机制,使得它们对温度因子的敏感度低于降水和太阳辐射因子。

4 讨论

4.1 再分析数据集不确定性分析

本研究基于 ERA5-LAND 气象数据和 CHIRPS 降水数据对黄河流域 2001—2020 年气温和降水的空间分布和变化趋势进行了分析,与王胜杰^[35]等,赵倩倩^[36]基于气象站点实测数据对本区气温和降水的变化趋势结果基本一致。但年均温度和降水有所不同,再分析数据得到的年均温度低估,年降水高估,这与马雪晴^[37]的研究结果一致,表明再分析数据虽然能整体反映实际气象状况,但仍然存在一定局限性,后续可以考虑对再分析数据进行一定校正处理,以进一步提升精度。

4.2 植被物候提取及其趋势特征

本研究基于 MODIS 的 MODI3Q1 V6.1 产品进行物候提取,与以往对黄河流域物候研究对比来看结果基本一致^[31,38—39],说明该产品与选择的提取方法是合理的。但是该产品的空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16 天,会在一定程度上影响提取的精度。在后续的研究中一方面可以考虑采用融合影像获取空间分辨率更高的遥感影像如 MODIS 和 Landsat 的融合影像^[40],另一方面可以选择以日为单位的 MODIS 影像产品如 MCD43A4 进行物候提取。

就 2001—2020 年黄河流域植被生长和结束时间来看,该区域的物候分布及变化存在明显的纬度梯度差异,随着纬度升高,光温水条件发生变化,温带草原和温带荒漠区域植被呈 SOS 和 MOS 推迟,LOS 缩短,这与李荣平等^[23]研究结果一致。除了纬度外,海拔也是影响植被物候的一个重要因素,因此虽然黄河流域中暖温带落叶阔叶林区域和暖温带落叶阔叶林区域纬度基本相同,但因海拔较高,暖温带落叶阔叶林区域呈现出植被 SOS 较晚,MOS 和 EOS 较早,LOS 短的特征,这与 Chen 等^[41]的研究结果一致。尤其是海拔在 3400m 以上时,随着海拔的升高,植被 SOS 出现推迟,EOS 提前且 LOS 缩短^[42]。

黄河流域植被物候的变化趋势与植被类型息息相关。整体来看表现出植被 SOS 和 MOS 提前, EOS 推迟, LOS 延长,但部分植被地带的趋势则与之相反,如温带南部典型草原和荒漠草原亚地带、温带灌木、禾草半荒漠亚地带和温带南部森林(草甸)草原。随着气候不断变化,相同区域植被物候对气候因子的敏感性也会逐渐减弱^[22]。北半球物候从 1982 年到 2012 年植被 SOS 提前, EOS 推迟, LOS 延长,但从 2002 年开始这一趋势变得迟缓,可能因为持续的升温使植被产生了一定的适应,导致其对温度或水分的敏感程度下降^[20]。

4.3 气候因子对植被物候的影响

影响植被物候的因素可以分为内因和外因,内因为植物个体的形态特征、进化特性、物种遗传特性以及生理控制等因素,外因一般指的是环境因素,如温度、降水、光照、土壤和地形等[43]。春季平均温度和最低温度的升高与降水的增多会使植物加速积累温度和水分进行生长发育,因此表现为 SOS 提前[44]。在本研究中,黄河流域的大部分植被区域都表现为这一规律,但黄土高原北部的温带荒漠地区却有所不同,温度升高使该区域 SOS 推迟,原因一方面是干旱地区植被对降水的需求大于温度,而温度升高反而会使土壤水分加剧蒸发,使 SOS 推迟,另一方面由于降水的间接作用,即降水会影响辐射和气温,从而影响 SOS[45]。对于太阳辐射,在亚热带常绿阔叶林区域的太阳辐射越大,植被光合作用越强烈,太阳辐射对空气和土壤的增温作用会越显著,导致太阳辐射的增强有利于植被的生长,推迟 EOS[46]。而温带草原和温带荒漠区域表现为太阳辐射增强,MOS 和 EOS 提前,这是因为本区降水较少,太阳辐射增强导致大气温度升高和相对湿度降低,增加了植被的蒸腾损失和水分胁迫,从而抑制了植被的生长[47],与之对应的则是降水增多使得 EOS 推迟,这与孔冬冬等[48]和邓晨晖等[49]研究结果一致,因为降水量的增多可以缓解温室效应带来的影响,延长植被的生命周期,特别是在降水量较少的区域。但本研究依然存在一定不足,在以后的研究中可以选取如寒带针叶林区等其他气候

类型的典型研究区,选取更多的响应因子,或对植被进行更加细致地划分,针对具体的植被,找到不同气候区不同植被物候制约因子的共性规律,以利于自然植被生态修复和重建。

5 结论

本研究以黄河流域 2001—2020 年的 MOD13Q1 NDVI 遥感数据为基础提取物候参数。分析该区气候和植被物候的时空变化趋势,探讨不同的植被类型区其物候特征,分析植被物候对气候(气温、降水、太阳辐射)的响应,各气候因素对物候参数影响大小,得到如下结论:

- (1) 黄河流域 2001—2020 年气候总体表现为上游高海拔地区寒冷干燥,中游到下游地区温暖湿润,整体气候呈暖湿化的发展趋势。
- (2) 黄河流域 2001—2020 年植被平均 SOS、MOS 和 EOS 为一年的第 140—160 天、第 210—220 天和第 270—280 天,LOS 为 110 d 的面积占比最大。空间分布上存在明显的纬度和海拔梯度差异,随着纬度升高和海拔的上升,植被物候出现 SOS 和 MOS 提前,EOS 推迟,LOS 缩短的现象。暖温带落叶阔叶林区域的 SOS 和 MOS 最早,温带南部典型草原亚地带和温带南部荒漠草原亚地带的 SOS 和 MOS 最晚,温带灌木、禾草半荒漠亚地带的 EOS 最晚,青藏高原高寒植被区域的 LOS 最短。
- (3) 黄河流域 2001—2020 年整体呈现植被 SOS 和 MOS 提前, EOS 推迟, LOS 延长的趋势, 温带南部典型草原和荒漠草原亚地带、温带灌木、禾草半荒漠亚地带和温带南部森林(草甸)草原地带趋势与之相反。
- (4) 黄河流域各植被分区的物候参数与对应生长期时段的气候因子之间存在一定的相关性,但这种相关性在不同植被分区中有所差异。温度因子对带北部典型草原亚地带、高寒草原地带和高寒草甸地带的物候参数影响较大,降水和太阳辐射因子对温带南部典型草原亚地带、温带灌木、禾草半荒漠地带、温带南部荒漠草原亚地带和中亚热带常绿阔叶林地带的物候参数影响较大。

参考文献(References):

- [1] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.
- [2] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. 中国科学: D辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [3] He J, Lyu D, He L, Zhang Y J, Xu X M, Yi H J, Tian Q L, Liu B Y, Zhang X P. Combining object-oriented and deep learning methods to estimate photosynthetic and non-photosynthetic vegetation cover in the desert from unmanned aerial vehicle images with consideration of shadows. Remote Sensing, 2022, 15: 105.
- [4] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社:1973: 1-131.
- [5] Caparros-Santiago J A, Rodriguez-Galiano V, Dash J. Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: a systematic review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 171; 330-347.
- [6] Leonor P C M, Bruna A, Swanni T. A, Bruno B, Elise B, Maria G G. C, Leonardo F. C, Daniel W. C, Diego F.E. E, Patrícia T.P. L, Irene M, Nathália M.W.B. R, Natalia C. S, Thiago S F S, Vanessa G. S, Annia S S, Betnia C. V, Carlos A. P. Linking plant phenology to conservation biology. Biological Conservation, 2016, 195: 60-72.
- [7] Peñuelas J, Rutishauser T, Filella I. Ecology. Phenology feedbacks on climate change. Science, 2009, 324(5929); 887-888.
- [8] Bai P, Liu X M, Zhang Y Q, Liu C M. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China. Water Resources Research, 2020, 56(10): e2019WR027019.
- [9] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, Viovy N, Demarty J. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21(3): GB3018-1-GB3018-11.
- [10] Chen S Z, Fu Y H, Hao F H, Li X Y, Zhou S, Liu C M, Tang J. Vegetation phenology and its ecohydrological implications from individual to global scales. Geography and Sustainability, 2022, 3(4): 334-338.
- [11] Pielke R A, Avissar R, Raupach M, Dolman J A, Zeng X B, Denning S A. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. Global Change Biology, 1998, 4(5): 461-475.
- [12] 曹沛雨, 张雷明, 李胜功, 张军辉. 植被物候观测与指标提取方法研究进展. 地球科学进展, 2016, 31(4): 365-376.
- [13] 项铭涛, 卫炜, 吴文斌. 植被物候参数遥感提取研究进展评述. 中国农业信息, 2018, 30(1): 55-66.
- [14] 谢宝妮,秦占飞,王洋,常庆瑞.基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应.农业工程学报,2015,31(15):153-160.
- [15] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 秦格霞, 侯青青, 谢保鹏, 吴华武. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应. 生态学报, 2021, 41 (16): 6600-6612.
- [16] Piao S L, Liu Q, Chen A P, Janssens I A, Fu Y H, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G, Zhu X L. Plant phenology and global climate change:

- current progresses and challenges. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [17] Fu Y H, Zhou X C, Li X X, Zhang Y R, Geng X J, Hao F H, Zhang X, Hanninen H, Guo Y H, De Boeck H J. Decreasing control of precipitation on grassland spring phenology in temperate China. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(2): 490-499.
- [18] Li X X, Fu Y H, Chen S Z, Xiao J F, Yin G D, Li X, Zhang X, Geng X J, Wu Z F, Zhou X C, Tang J, Hao F H. Increasing importance of precipitation in spring phenology with decreasing latitudes in subtropical forest area in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 304/305; 108427.
- [19] Chen X Z, Ciais P, Maignan F, Zhang Y Y, Bastos A, Liu L Y, Bacour C, Fan L, Gentine P, Goll D, Green J K, Kim H, Li L Z X, Liu Y, Peng S, Tang H, Viovy N, Wigneron J, Wu J, Yuan W, Zhang H C. Vapor pressure deficit and sunlight explain seasonality of leaf phenology and photosynthesis across Amazonian evergreen broadleaved forest. Global Biogeochemical Cycles, 2021, 35(6): e2020GB006893.
- [20] 丛楠, 张扬建, 朱军涛. 北半球中高纬度地区近 30 年植被春季物候温度敏感性. 植物生态学报, 2022, 46(2): 125-135.
- [21] 付永硕,李昕熹,周轩成,耿晓君,郭亚会,张雅茹.全球变化背景下的植物物候模型研究进展与展望.中国科学:地球科学,2020,50 (9):1206-1218.
- [22] 姚荣鹏, 张勃, 张耀文, 王立兵. 甘肃河东地区植被物候及其对气候变化的响应. 生态学杂志, 2022, 41(4): 714-723.
- [23] 李荣平, 周广胜. 1980—2005 年中国东北木本植物物候特征及其对气温的响应. 生态学杂志, 2010, 29(12) ; 2317-2326.
- [24] 樊星,秦圆圆,高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议. 环境保护, 2021, 49(S2): 44-48.
- [25] Keenan T, Richardson A. The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology; implications for predictive models. Global Change Biology, 2015, 21 (7): 2634-2641.
- [26] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 李双双. 2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素. 中国沙漠, 2021, 41(4): 205-212.
- [27] 张新时. 中华人民共和国植被图(1:1000000). 北京: 地质出版社, 2007.
- [28] 吴川虎,陶于祥,罗小波. 基于 Google Earth Engine 的重庆市植被指数长时间序列 S-G 滤波方法的改进与实现. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1189-1198.
- [29] Zeng L L, Wardlow B D, Xiang D X, Hu S, Li D R. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111511.
- [30] 王敏钰,罗毅,张正阳,谢巧云,吴小丹,马轩龙. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展. 遥感学报, 2022, 26(3): 431-455.
- [31] Wang Y Q, Luo Y, Shafeeque M. Interpretation of vegetation phenology changes using daytime and night-time temperatures across the Yellow River Basin, China. Science of the Total Environment, 2019, 693; 133553.
- [32] 李晶,崔绿园,闫萧萧,杨震,董金玮,邓晓娟.草原矿区长时序植被覆盖度变化趋势对比分析.测绘通报,2019(8):130-134,157.
- [33] 曹俊忠. 一元线性回归显著性检验方法分析. 西安工程科技学院学报, 1988, 2(S1): 78-82.
- [34] 徐嘉昕,房世波,张廷斌,朱永超,吴东,易桂花. 2000—2016 年三江源区植被生长季 NDVI 变化及其对气候因子的响应. 国土资源遥感,2020,32(1):237-246.
- [35] 王胜杰,赵国强,王旻燕,范学峰,王成刚. 1961—2020 年黄河流域气候变化特征研究. 气象与环境科学, 2021, 44(6): 1-8.
- [36] 赵倩倩. 气候变化背景下黄河流域植被变化成因及未来预估[D]. 银川:宁夏大学, 2022.
- [37] 马雪晴. 基于大气再分析数据的内蒙古半干旱草原植被物候预测研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- [38] Yuan M X, Zhao L, Lin A W, Li Q J, She D X, Qu S. How do climatic and non-climatic factors contribute to the dynamics of vegetation autumn phenology in the Yellow River Basin, China? Ecological Indicators, 2020, 112: 106112.
- [39] 罗婉琳, 韩琳, 吴满玉, 杨佳音, 侯亚坤. 黄河流域植被物候遥感提取及空间分布. 科学技术创新, 2021(31): 1-4.
- [40] 赵巧珍, 丁建丽, 韩礼敬, 金晓叶, 郝建平. MODIS 和 Landsat 时空融合影像在土壤盐渍化监测中的适用性研究——以渭干河—库车河 三角洲绿洲为例. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1155-1164.
- [41] Chen L, Huang J G, Ma Q Q, Hänninen H, Rossi S, Piao S L, Bergeron Y. Spring phenology at different altitudes is becoming more uniform under global warming in Europe. Global Change Biology, 2018, 24(9): 3969-3975.
- [42] 黄文洁,曾桐瑶,黄晓东.青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征.草业科学, 2019, 36(4): 1032-1043, 919.
- [43] Shen M G, Wang S P, Jiang N, Sun J P, Cao R Y, Ling X F, Fang B, Zhang L, Zhang L H, Xu X Y, Lyu W W, Li B L, Sun Q L, Meng F D, Jiang Y H, Dorji T, Fu Y H, Iler A, Vitasse Y, Steltzer H, Ji Z M, Zhao W W, Piao S L, Fu B J. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10); 633-651.
- [44] Saxe H, Cannell M G R, Johnsen Ø, Ryan M G, Vourlitis G. Tree and forest functioning in response to global warming. New Phytologist, 2001, 149(3): 369-399.
- [45] Cong N, Wang T, Nan H J, Ma Y C, Wang X H, Myneni R B, Piao S L. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010; a multimethod analysis. Global Change Biology, 2013, 19(3): 881-891.
- [46] 常博,刘贤德,王顺利,张玉珍,张学龙,孙于卜.祁连山不同坡向草地蒸散量及其影响因子的分析.中南林业科技大学学报,2014,34 (4):90-95.
- [47] 何玉杰,孔泽,户晓,张江,王猛,彭长辉,朱求安.水热条件分别控制了中国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势. 生态学报, 2022, 42(2): 766-777.
- [48] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. 地理学报, 2017, 72(1): 39-52.
- [49] 邓晨晖, 白红英, 高山, 黄晓月, 孟清, 赵婷, 张扬, 苏凯, 郭少壮. 1964—2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应. 地理学报, 2018, 73(5): 917-931.