

doi: 10.6046/zrzyg.2021400

引用格式: 王雅婷,朱长明,张涛,等. 2002—2020 年秦岭—黄淮平原交界带植被物候特征遥感监测分析[J]. 自然资源遥感, 2022,34(4):225–234. (Wang Y T,Zhu C M,Zhang T,et al. Remote sensing monitoring and analysis of the vegetation phenological characteristics of the Qinling Mountains – Huanghuai Plain ecotone from 2002 to 2020[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022,34(4):225–234.)

2002—2020 年秦岭—黄淮平原交界带 植被物候特征遥感监测分析

王雅婷¹, 朱长明¹, 张 涛², 张 新³, 石智宇¹

(1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院,徐州 221116; 2. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心,长沙 410600; 3. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室,北京 100101)

摘要: 针对植被物候对全球变化的响应存在非线性、区域差异性以及秦岭南北气候典型差异性,选取秦岭—黄淮平原交界带为研究区,利用 2002—2020 年 MOD09Q1 遥感数据,通过自适应动态阈值法提取秦岭—黄淮平原交界带物候特征关键参数,详细刻画区域植被物候时空变化过程,分析时空分异特征,并结合气温数据探究区域植被物候对气候变化的响应。研究结果表明: ①秦淮交界带植被物候特征空间分异明显,森林植被物候始期和末期均晚于农田植被,森林植被物候始期为第 67—116 天,末期为第 280—340 天;农田植被物候始期位于第 49—92 天,末期为第 195—328 天;森林植被生长期长度为 215~262 d,农田植被为 147~261 d;且森林植被物候受到海拔影响,海拔越高物候始期越晚,物候末期越早。②2002—2020 年秦淮交界带植被物候始期和物候末期时间总体呈现提前的变化趋势、生长期长度变短;森林和农田的物候始期变化趋势分别为: $-0.14\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.1\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$,末期变化趋势分别为 $-0.78\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-1.43\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 。③秦淮交界带地区物候变化特征与区域气温(3 月与 9 月气温)显著相关,根据现有站点观测数据分析表明气温上升导致了区域的物候期提前。

关键词: 植被物候; 秦岭—黄淮平原; 交界带; 时空变化; 遥感

中图法分类号: TP 79; Q 948; X 17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0225-10

0 引言

植被物候是区域生态环境变化指示因子,研究植被物候变化对全球气候变化的响应,对了解气候变化带来的消极影响,认识气候变化的影响过程具有重要意义。物候变化现象中最为显著的就是春季物候,目前在全球、区域不同尺度上都对春季物候进行了研究,结果表明多数植被春季物候具有提前的趋势^[1],秋季物候期呈现推迟趋势,但是变化趋势不明显^[2]。虽然物候变化趋势普遍相同,受到区域气候或植物进化变异等因素的影响,研究结果的变化幅度却存在差异^[3]。Walkovszky^[4] 通过比较 1851—1994 年匈牙利地区洋槐树的开花日期发现

开花期提前了 3~8 d; Sparks 等^[5] 在气候变暖背景下分析了英国 13 种植物在 58 a 间的开花期与当地温度的关系,发现气温每上升 1℃,花期会提前 2~10 d; Tucker 等^[6] 利用归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)数据分析高纬度植被生长情况,发现随着气温增加,纬度越高,物候始期提前的时间越早;郑景云等^[7] 根据我国 26 个站点物候观测资料分析得到植被物候对气温变化的响应为非线性关系,气温每上升 1℃,春季物候平均提前 3.5 d。随着遥感技术的发展,利用遥感数据反演的物候信息与实际测量的数据差异较小,逐渐被应用到植被物候分析领域,实现了从微观观测到宏观观测不同尺度的转换^[8-9]。Wu 等^[10] 利用 NOAA/AVHRR NDVI 数据通过导数法获取我国 1982—

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-04-14

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目“北斗智能精准定位技术集成及区域服务业创新示范”(编号: 2021YFB1407004)、科技基础性工作专项计划项目“大别山地区生态修复支撑调查”(编号: DD20208074)、农业产业数字化地图项目(编号: 21C00346)和江苏师范大学研究生科研与实践创新计划校级项目“2000—2020 年秦淮交错带植被物候变化分析”(编号: 2021XKT0084)共同资助。

第一作者: 王雅婷(1998-),女,硕士研究生,研究方向为生态环境遥感、植被物候对全球变化的响应等。Email: wangyatingQYZ@163.com。

通信作者: 朱长明(1983-),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为遥感信息智能提取、生态环境遥感研究。Email: zhuchangming@jsnu.edu.cn。

2006 年 6 个生物群落的春季物候并与气候数据进行分析,结果表明在春季气温的主要影响下,春季物候在这 25 a 间呈现先提前后推迟的趋势;刘玲玲等^[11]利用 GIMMS AVHRR NDVI 数据通过动态阈值法提取了 1982—2006 年亚欧大陆上植被的物候始期,得到 25 a 间植被物候始期主要呈现提前趋势;Ge 等^[12]利用 NOAA/AVHRR NDVI 数据通过经验正交函数分析法得到 1982—2012 年中国植被的物候始、末期,以 1996 年和 2009 年为时间点,物候始期呈现出先提前后推迟的趋势,而物候末期在 1993 年后才表现出推迟的趋势。

秦岭—黄淮平原交界带(以下简称交界带)位于我国大陆中东部重要的地理过渡带,属于我国的地理南北分界过渡带和亚热带与温带气候过渡区。交界带生态系统相对脆弱、植被物候对气候条件变化的响应也更加敏感,对监测气候变化起到很好的指示作用^[13-14]。秦岭作为我国重要的自然体,尤其是秦岭南北坡气候具有典型差异性^[15-16],其植被物候变化特征已被众多学者研究^[17-19]。郭少壮等^[20]利用 MODIS EVI₂ 数据通过曲线拟合法计算得到 2000—2015 年秦岭太白红杉林的物候始、末期,结果表明物候始期主要受到气温的影响呈提前趋势,而末期主要在气温、降水和潜在蒸散的影响下呈推迟趋势;李健豪等^[21]利用 2001—2018 年 MODIS 数据提取植被春季物候期并研究了不同海拔上的物候变化特征,研究表明海拔每升高 100 m,春季物候期推迟 1.82 d。但是,植被物候对全球气候变化的响应存在时间尺度非线性 and 区域显著差异性,交界带形成了不同于秦岭山地与平原气候的独特边际气候效应^[22],植被类型复杂多样、植被物候的空间分布与时间变化都存在着显著的空间差异性。虽然学者已对秦岭物候展开了相关研究,但是利用遥感技术手段,在区域尺度通过植被 NDVI 年度时序特征,反演物候关键特征,分析交界带地区植被物候变化时

空特征及其对环境响应的研究还较少。因此厘清区域植被物候变化过程和时空分异,揭示全球变暖背景下交界带关键物候特征演化规律,对于认识过渡带植被物候变化对全球变暖的响应、区域粮食生产安全等具有重要意义。

为此,本文充分利用 2002—2020 年 MOD09Q1 遥感数据构建密集时序 NDVI 遥感数据,以秦岭—黄淮平原交界带为研究区,利用自适应动态阈值法反演陆地表面物候并研究其变化趋势,从大尺度上了解气候交界带植被物候时空格局及变化趋势,进而利用相关分析量化植被物候与气温之间的响应关系,为研究全球变化对区域植被生态系统的影响提供了支撑。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

研究区主要位于河南省、湖北省交界处,地处我国二、三阶梯之间,是重要的地理过渡带,如图 1 所示。参考管华等^[23]对于秦岭—黄淮平原交界带地理位置的界定以及我国行政区划范围,划定研究区的西北部为秦岭余脉,东北部处于黄淮平原,西南部为南阳盆地,东南部为大别山区^[24]。研究区总面积约为 8 万 km²,海拔为 14 ~ 2 127 m,气候以温带落叶阔叶林气候、亚热带常绿阔叶林气候为主。交界带地形从平原到山脉起伏较大,植被类型也更加丰富,生态系统包括了农田、草地和森林,地理环境兼具水平梯度性和垂直梯度性。其中,耕地主要分布在海拔较低的西部、东部以及东北部,种植作物包括水稻、小麦、玉米等;林草资源主要分布在海拔较高的西北、中部以及南部地区,主要以亚热带常绿阔叶混交林为主;城镇等建设用地则零星分布于耕地之间,交界带土地利用类型具有明显的空间分异性。

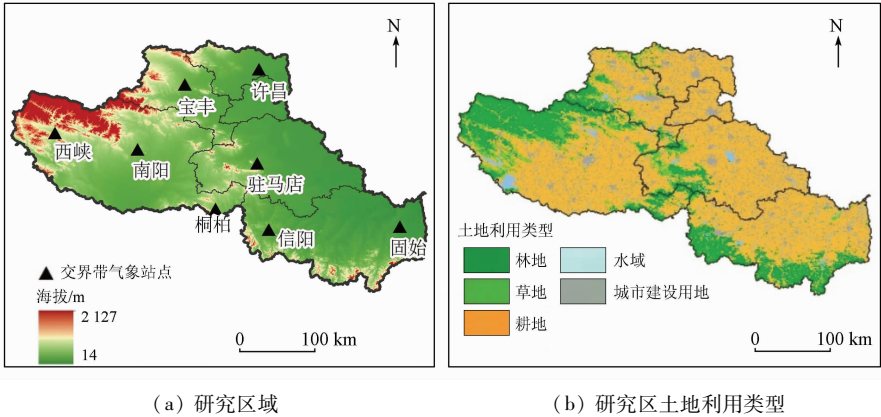


图 1 研究区示意图
Fig.1 Study area

1.2 数据源及预处理

本文所使用的数据来自美国国家航空航天局官方网站(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)下载的 MOD09Q1 的 8 d 合成数据,文件格式为 HDF,包括红光和近红外 2 个波段。数据覆盖的时间范围为 2002—2020 年,空间分辨率为 250 m。虽然官网提供免费的 16 d 合成的 NDVI 数据产品,但是植被物候关键期的提取极易受到数据时间间隔的影响,数据时间间隔过大会增加结果的不准确性;此外,官网也提供每日的数据资料,但是其空间分辨率较小,像元内地物混杂现象严重。因此,综合现有数据的时间、空间分辨率以及波段范围,本文选取了 MOD09Q1 的 8 d 合成数据作为原始数据。

植被叶片能够吸收太阳光线中的蓝光和红光,而对绿光和近红外波段具有反射作用,利用 NDVI 能够表征植被对红光和近红外波段的辐射强度,进而反映出植被在不同生长阶段的光合作用强度和绿度,是量度植被生长状况和季节变化的良好指标^[11,25]。原始数据为三级 MODIS 数据产品,投影方式为正弦函数投影,对原始数据进行预处理,包括拼接、投影、格式转换、裁剪等。

土地利用类型数据来自资源环境科学与数据中心。气象数据则来自国家气象信息中心制作的中国地面气候资料日值数据第三版,数据集中包括 2001—2019 年的气象站点号、站点所在经纬度、海拔、观测日期、当日的最高、最低和平均温度以及质量控制代码。

2 研究方法

2.1 遥感物候反演方法

传感器精度、云等因素影响使得密集 NDVI 时间序列存在噪声,模糊了 NDVI 的变化趋势,因此需要重构 NDVI 时间序列^[26]。多项式拟合法计算简单、快速,何月等^[27]利用分段二次多项式拟合了浙江省的植被指数曲线,而与二次多项式相比,六次多项式能够拟合整个生长季曲线^[28],因此本文利用六次多项式对 NDVI 时序曲线进行拟合,公式为:

$$NDVI = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + \cdots + a_7 x^6, \quad (1)$$

式中: X 为生长季始期的儒略日; $a_1, \cdots, a_7$ 分别为拟合系数。

考虑到密集 NDVI 时间序列的变化特征,本文采取自适应动态阈值法提取物候关键参数。动态阈值法是在阈值法的基础上进行改进、不需要考虑土壤属性和土地覆被类型的物候参数提取算法,其阈

值设置更加灵活。动态阈值法认为当 NDVI 值达到时序曲线变化幅值的某一百分比时植被生长期开始,当 NDVI 值下降到幅值的某一百分比时生长期结束。该方法以动态比值的形式与植被指数的季节变化幅度相联系,能够降低土壤与植被类型的影响,具有较好的时空适应性^[18,29-30]。根据动态阈值提出者 Jönsson 等^[31]的建议,将动态阈值设为 20%,即 NDVI 值上升(下降)至幅值 20% 的日期为生长始期(生长末期)。具体公式为:

$$N_{NDVI} = (N_{NDVI_{max}} - N_{NDVI_{min}})S, \quad (2)$$

式中: N_{NDVI} 为生长始期(生长末期) NDVI 的提取阈值; $N_{NDVI_{max}}$ 为年 NDVI 最大值; $N_{NDVI_{min}}$ 为 NDVI 上升下降阶段的最小值; S 为百分比系数,设置为 20%。物候始期和末期分别定义为首次高于和低于该阈值的日期。生长期为生长末期与始期的时间间隔。遥感影像获取的植被物候参数与传统人工观测的物候参数不同,遥感影像能够识别到的是达到了一定程度的植被绿度,反映的是大尺度的陆地表面物候特征^[27,32],因此,这里得到的生长始、末期是指观测单元内足够多的植被开始展叶、生长或进入衰亡、休眠的日期^[33]。此外,考虑到研究区内可能存在多季农田植被,计算物候末期时寻找的 NDVI 最大(小)值从时间序列的最末端首个曲线变化阶段开始寻找。由于本文缺少实地观测数据,故不进行精度验证,但参考其他学者的以往经验,以 20% 的阈值提取物候信息,都获得了较好的精度^[34-36]。

2.2 分析方法

2.2.1 趋势分析

采用一元线性回归分析来模拟交界带物候关键参数的年际变化趋势,统计其变化趋势的变化速率,计算公式^[37]为:

$$\theta = \frac{n \sum_{i=1}^n (i p_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n p_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (3)$$

式中: θ 为物候关键参数的变化速率; n 为时间序列的年份跨度; i 为当年的序列号; p_i 为植被 i 年物候始、末期或者生长期的时间长度。当 $\theta > 0$ 时,植被物候期的变化趋势为推迟或延长;当 $\theta < 0$ 时,植被物候期的变化趋势为提前或收缩。

2.2.2 相关分析

为了分析气温变化对物候期的影响,本文利用相关分析探究交界带地区物候始、末期与气温的相关关系 r ,计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2) (\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2)}} \quad (4)$$

式中： T_i 为第*i*年的气温数据； X_i 为第*i*年的物候数据(包括物候始期与物候末期)； $\bar{T}$ 和 $\bar{X}$ 分别为多年气温和物候的均值。相关系数的取值范围为[-1, 1],当相关系数的绝对值越大表明气温对物候的影响越大,反之则越小。

3 结果与分析

3.1 样区 NDVI 值拟合曲线特征

秦岭—黄淮平原交界带地区植被以森林和农田植被为主,2类植被的 NDVI 时序数据如图 2 所示,时间范围为第 49—361 天,共 40 期数据。原始 ND-

VI 时序数据有明显的变化特征,具有波峰与波谷,但是存在许多噪声,使得曲线具有不规则的波动,不利于植被物候期的计算。经过拟合后的曲线变的平滑且更加连续,原始数据的波峰、波谷位置没有明显的移动。一般森林植被(图 2(a))在 11—12 月时 NDVI 值应呈现连续下降或不变的趋势特征,但拟合后的曲线呈现先下降后上升的趋势,出现了局部过拟合的现象,可能会影响部分像元的物候末期反演结果。农田植被(图 2(b))的 NDVI 时序数据变化更为复杂,由于研究区内多为 2 季作物,因此,农田植被的拟合曲线存在 2 个较完整波型。2 月下旬,天气回暖,NDVI 值逐渐上升;6 月初第一季农田植被成熟,NDVI 值逐渐下降至波谷;第二季农田植被于 6 月开始播种,NDVI 值再次上升,至 10 月份收割,NDVI 值再次下降至波谷,由此循环再开始种植第一季农田植被。

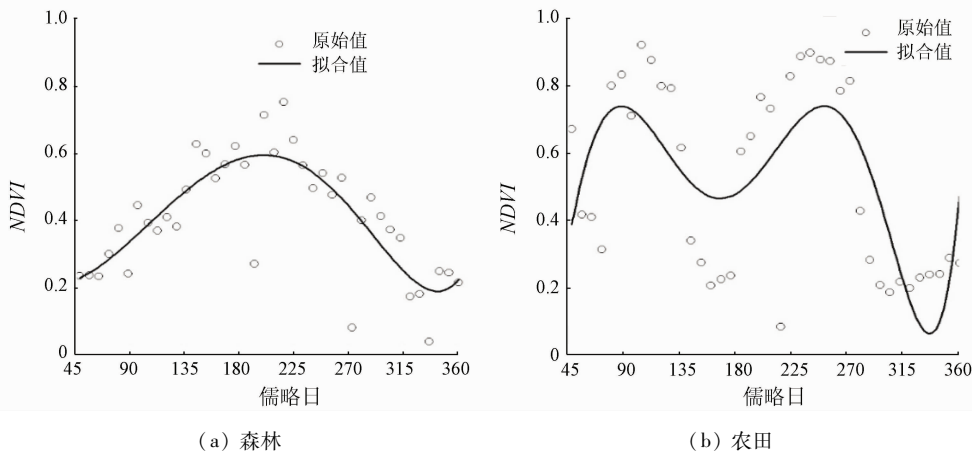


图 2 样区典型植被 NDVI 时序拟合曲线
Fig. 2 Typical sample fitting curve of NDVI

3.2 植被物候空间分布特征

研究区植被物候空间分布特征如图 3 所示。从图 3 中可以看出,区域植被物候始期时间为第 50—125 天;区域植被物候末期时间为第 230—320 天;区域植被生长期长度为 180 ~ 260 d。由于交界带地理位置的特殊性,森林与农田植被在该区都有分布,

2 类植被对气候条件的响应具有空间差异性。西北、东南和中部森林植被覆盖区进入物候始期时间明显晚于农田植被区,且与海拔高度相适应,从交界带边界向内部逐渐随着海拔的降低而提前。而西部、东北以及东部农田植被区的物候末期早于森林。

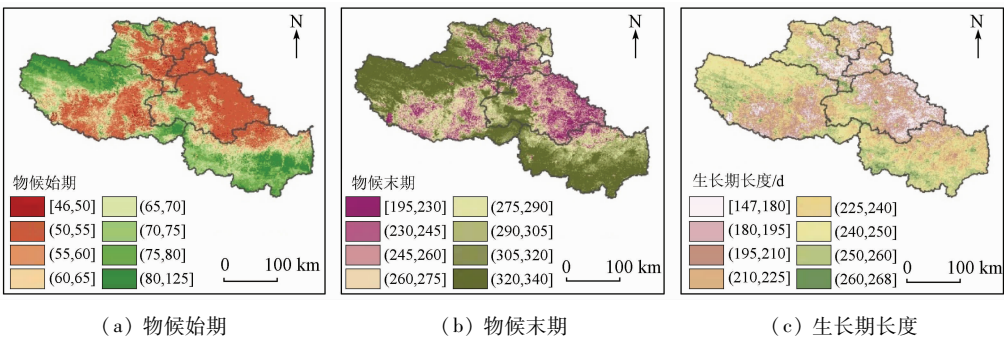


图 3 研究区植被物候空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation phenology in the study area

进一步根据区域土地利用数据,分别统计计算森林植被区和农田植被区物候空间分布特征。结果显示森林植被物候始期在第 67—116 天,均值为第 77 天,农田植被物候始期在第 49—92 天,均值为第 62 天;森林植被物候末期在第 280—340 天,均值为第 323 天,农田植被物候末期在第 195—328 天,均值为第 279 天;森林植被生长期长度为 215~262 d,均值为 248 d,农田植被生长期长度为 147~261 d,均值为 218 d。农田植被受到田间管理的影响较大,其生长发育期与森林植被具有差异性。农田植被进入物候始期的时间约早于森林植被 15 d,进入物候末期的时间也早于森林植被 44 d,生长期长度比森林植被短 30 d,其生命进程要快于森林植被。

3.3 植被物候年际变化趋势

研究区植被物候变化趋势如图 4 所示,该区物候始期变化率主要集中在 -0.9~1 d/a 之间,

63.2% 的区域呈提前趋势,主要分布在东部农田、南部森林,交界带总体变化率为 0.046 d/a;物候末期变化率主要集中在 -4.6~1 d/a 之间,其中 78.5% 的区域呈现提前趋势,主要分布在西部农田植被区和西北、东南部的森林植被区,交界带总体变化率为 -1.3 d/a;生长期长度变化速率集中在 -4.5~1 d/a,75.8% 的区域生长期长度呈缩短趋势,主要分布在西部和东部农田植被区,交界带总体变化率为 -1.3 d/a。从显著性来看,森林植被与农田植被具有不同的特点。森林植被的物候始期比农田植被提前的趋势更显著,而农田植被的物候末期提前趋势更显著。这是因为森林植被在春季进入物候始期时,树木大范围变绿,易于探测。进入物候末期时,森林植被颜色变化过程缓慢,色彩混杂,不易探测,而农田植被成熟与收割过程变化十分明显。

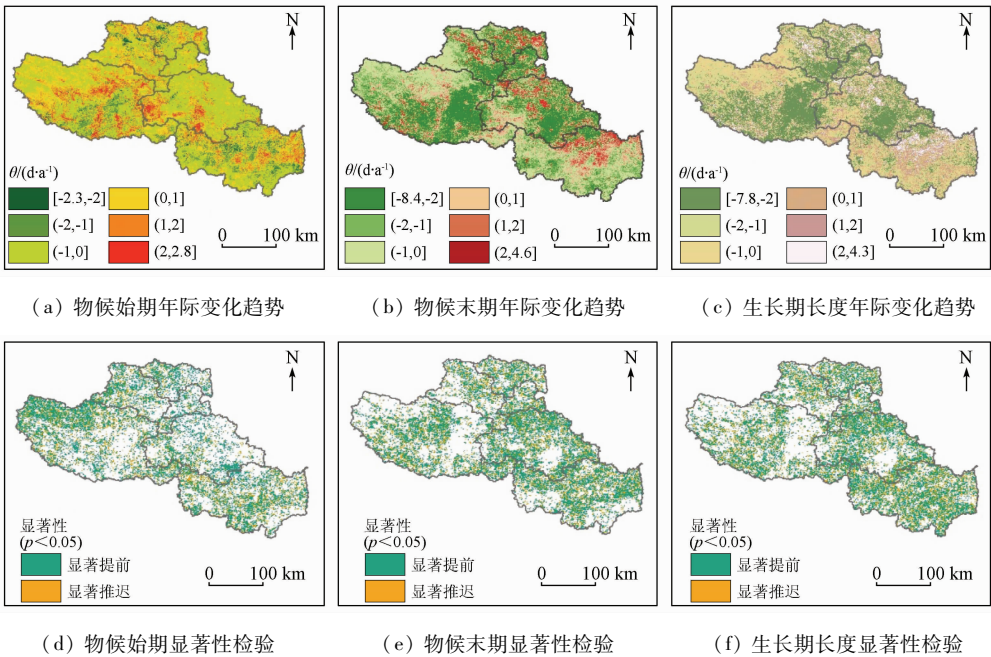


图 4 研究区植被物候期年际变化趋势

Fig.4 Spatial distribution of interannual change trend of vegetation phenology in the study area

根据区域土地利用数据统计计算森林植被区和农田植被区物候多年变化趋势特征。结果显示,森林植被区物候始期变化范围为 -1.5~1.5 d/a,农田植被区物候始期变化的范围为 -2.3~2.8 d/a;森林植被与农田植被物候末期的变化范围分别为 -7~1.5 d/a 和 -8.4~4.6 d/a,森林植被区生长期长度变化的范围为 -5.2~1.9 d/a,农田植被区的变化范围是 -7.8~4.3 d/a。农田植被的变化幅度要大于森林植被。从均值来看,森林和农田的物候始期变化趋势分别为: -0.14 d/a 和 0.1 d/a,末

期变化趋势分别为 -0.78 d/a 和 -1.43 d/a。除农田植被区物候始期的变化趋势呈推迟趋势外,其余植被物候均呈提前趋势。

3.4 植被物候与气温响应关系

从图 5 中可以看出,春季、夏季、秋季气温均呈上升趋势,变化率分别为 0.06 ℃/a, 0.07 ℃/a, 0.04 ℃/a,其中夏季升温趋势明显($p < 0.01$),而冬季气温以 -0.001 ℃/a 的变化率呈下降趋势,变化速率极缓,但总体上交界带地区气温呈波动上升的趋势,年均气温的变化率为 0.04 ℃/a($p < 0.05$)。

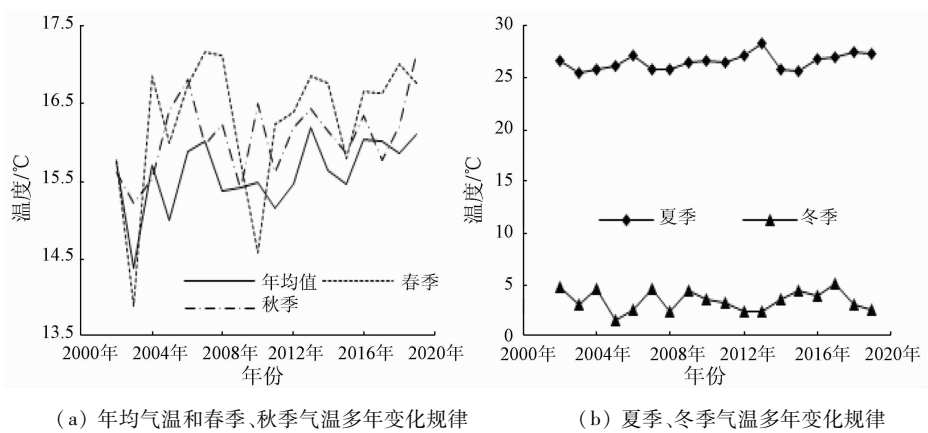


图5 研究区气温年、季变化

Fig.5 Annual and seasonal changes of temperature in study area

植物物候对于气温有良好的响应作用,且响应关系存在1—2个月的滞后效应^[17],结合交界带物候关键参数范围,选择冬季(12—2月)、春季(3—5月)、1月、2月、3月均温以及夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、8月、9月、10月均温分别与物候始、末期进行相关分析^[18,38-40],以探究物候对气温的响应关系。常用的气温空间插值方法虽能获取大范围的温度特征,但受到模型自身误差与外界条件的影响,

不同方法的结果存在一定差异,插值精度有待提高^[41],因此,为准确研究植被物候对气温的响应关系,采用8个气象站点记录数据与当地物候参数进行相关分析,由于缺少2020年研究区域的气温统计数据,本文仅统计分析2002—2019年间研究区植被物候始、末期与相应时期气温的相关关系,如表1所示。

表1 植被物候与各时期气温的相关关系

Tab.1 Correlation coefficient of phenology and temperature at each period

站点	物候始期					物候末期				
	冬季	春季	1月	2月	3月	夏季	秋季	8月	9月	10月
固始	-0.144	0.229	-0.008	-0.208	-0.150	0.019	0.012	-0.221	-0.404	-0.488 *
信阳	-0.096	-0.642 **	0.100	0.099	-0.286	-0.337	-0.356	-0.607 **	-0.604 **	-0.364
许昌	0.317	-0.059	0.509	0.403	0.262	-0.171	-0.349	-0.051	0.201	-0.158
宝丰	0.157	0.376	0.037	0.225	0.131	0.298	0.024	0.160	0.114	-0.026
桐柏	0.006	-0.407	0.236	0.027	-0.117	0.119	0.093	-0.037	-0.304	-0.306
驻马店	-0.463	-0.739 **	0.027	-0.158	-0.811 **	-0.233	-0.428	-0.140	0.261	-0.512 *
南阳	-0.111	-0.152	-0.294	-0.014	-0.129	-0.053	-0.342	-0.369	-0.244	-0.287
西峡	-0.034	-0.165	-0.083	-0.145	-0.201	-0.121	-0.150	-0.282	-0.669 **	0.090

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

近十几年来,秦岭—黄淮平原交界带植被物候期受到气温的影响较一致,但仍存在区域差异。气温与物候始期主要呈负相关关系,尤其与3月、春季气温呈显著的负相关关系,相关系数分别可以达到-0.811以及-0.739,这说明,气温升高对植被的生命活动有促进作用。部分地区物候参数与气温的相关关系如图6所示,信阳地区植被对春季气温敏感,气温每升高1℃,物候始期提前7.1d;3月气温与驻马店植被物候始期有显著的负相关关系,3月气温每上升1℃,物候始期提前0.5d。其余地区受到气温的影响不显著。信阳地区物候末期与8月气

温存在显著负相关关系,气温每升高1℃,物候末期提前5d、西峡地区物候末期与9月气温存在显著负相关关系,气温每升高1℃,物候末期提前12.06d。固始和驻马店地区物候末期对10月气温的响应较显著,气温每升高1℃,物候末期分别提前13.3d和21.6d。其他地区物候末期受到气温影响较小。物候参数与气温数据主要呈负相关关系,这与植被物候变化趋势一致,研究区气温波动上升,导致物候始、末期主要为提前趋势。由于气温升高,促进了植被生命活动速率,作物生长期缩短、提前成熟。

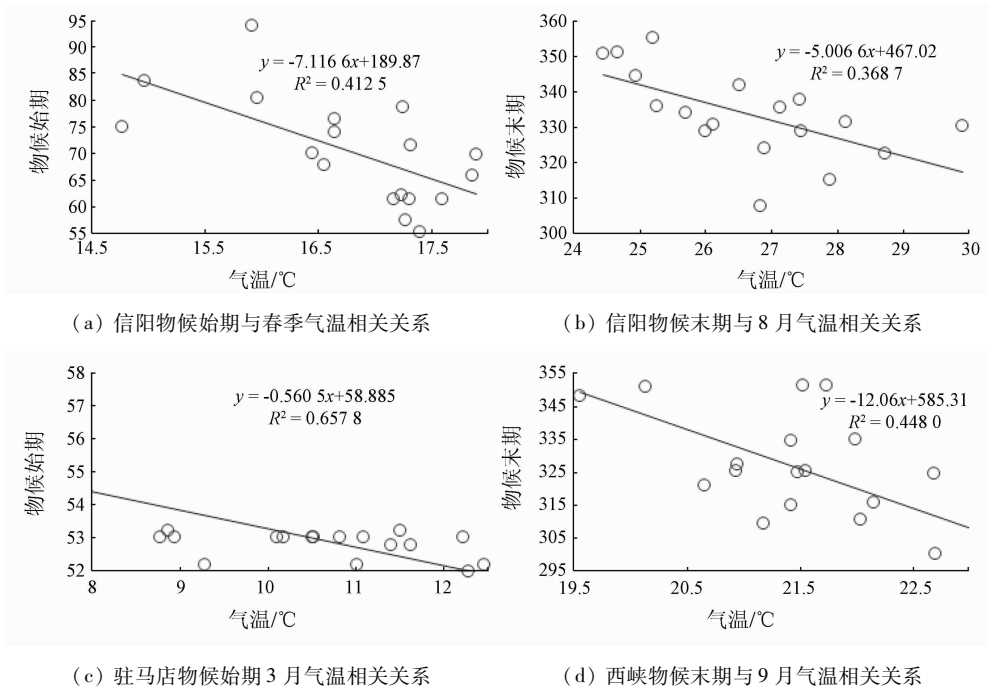


图 6 物候参数与气温的相关关系

Fig. 6 Relationship between the vegetation phenology and the temperature in study area

4 讨论

由于研究区内尚未建立物候观测站点,无法直接获取物候资料与本文结果进行验证,因此,本文将研究结果与其他学者研究结果进行对比分析,以验证结果的正确性。研究区西部为秦岭余脉,夏浩铭等^[19]研究表明该区域物候始期集中在第 70—100 天;李建豪等^[21]研究结果进一步表明秦岭东部物候始期均值为第 85 天,本文研究结果为物候始期主要分布在第 79—95 天,均值为第 77 天,与已有研究结果相差较小;张晓东等^[42]研究结果表明该区域物候末期主要集中在第 300—315 天,本文结果表示物候末期均值为第 323 天,相较于张晓东等研究,末期时间有所推迟,但是相差结果在 7 d 内,可能是由于研究时间、区域不同导致的略微差异,此外,本文的拟合方法出现局部过拟合现象,也会对结果造成影响,但是仍具有可比性。侯学会等^[43]研究结果表明研究区作物物候始期集中在 2 月下旬;崔耀平等^[44]研究结果表示该区域作物物候末期主要集中在 9 月下旬,本文结果表示物候始、末期均值分别为第 62 天和第 279 天,与已有研究结果时间相似。因此,结合之前有关学者研究,可以认为利用动态阈值法获取的植被物候具有一定可靠性。

需要指出的是,物候提取精度受到研究方法、研究尺度、植被类型、数据质量等多种因素的影响,研究结果存在一定差异。本文采用六次多项式对原始

NDVI 时序数据进行拟合,高次多项式和低次多项式相比能够更好地对整个生长季曲线进行拟合,但是不可避免的出现了局部过拟合现象,这会对物候提取结果造成一定影响。本文重点探究了植被物候对气温变化的响应关系,但是受到观测手段和尺度的差异,拟合分析效果不是特别好,且物候是气温(积温)、降水等多要素共同影响的结果,可进一步通过因子分析从多要素综合角度去探究影响物候的关键因素。此外,土地利用方式和轮作方式的改变会对研究结果产生干扰,尤其是对物候末期。近 20 a 来,研究区内由林地、草地转为耕地的面积占 5%,由于农田植被的物候末期要早于森林植被导致了本文所计算的物候末期提前速率过快;河南省粮食种植结构受到政策等人为因素影响,秋季作物播种面积大于夏季作物且逐年增加,作物选种为早播、生育期长的种类^[45],在计算物候期时,受到秋播时间提前的影响,进一步影响了农田植被物候末期的提前速率。

5 结论

基于 2002—2020 年密集时序 MOD09Q1 遥感数据,通过年度 NDVI 自适应动态阈值法,提取了秦岭—黄淮平原交界带植被物候关键特征参数,分析物候特征参数的时空变化特征及变化趋势,并结合区域气象站点观测数据探究了各地气温对物候变化的影响关系。研究得到以下结论:

1)秦淮交界带植被的物候始期主要在第 50—125 天,物候末期主要集中在第 230—320 天,生长期长度 180~260 d;交界带地区森林植被与农田植被物候分布差异显著,森林植被与农田植被的物候始期分别在第 67—116 天和第 49—92 天;森林植被与农田植被的物候末期分别在第 280—340 天和第 195—328 天;森林植被与农田植被的生长期长度分别为 215~262 d 和 147~261 d。森林植被物候始、末期均晚于农田植被,分别推迟了 15 d 和 44 d,生长期长度则长于农田植被约 30 d。

2)2002—2020 秦淮交界带植被物候始期和物候末期时间总体呈现提前的变化趋势、生长期长度变短;森林和农田的物候始期变化趋势分别为 -0.14 d/a 和 0.1 d/a ,森林和农田的物候末期变化趋势分别为 -0.78 d/a 和 -1.43 d/a ,森林植被物候始期提前的趋势更明显,而农田植被物候末期提前更显著。

3)秦淮交界带地区植被物候变化与区域气温显著相关,其中物候始期与 3 月气温关系最显著,物候末期与 9 月气温关系显著。根据区域气候变化特征得到,气温上升导致了物候期的提前。

参考文献 (References):

[1] Parmesan C,Gary Y. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. *Nature*,2003,421(6918):37-42.

[2] Ge Q S,Wang H J,Rutishauser T,et al. Phenological response to climate change in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*,2015,21(1):265-274.

[3] 代武君,金慧颖,张玉红,等. 植物物候学研究进展[J]. *生态学报*,2020,40(19):6705-6719.

Dai W J, Jin H Y, Zhang Y H, et al. Advances in plant phenology[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2020,40(19):6705-6719.

[4] Walkovszky A. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary[J]. *International Journal of Biometeorology*,1998,41(4):155-160.

[5] Sparks T H,Jeffree E P,Jeffree C E. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK[J]. *International Journal of Biometeorology*,2000,44(2):82-87.

[6] Tucker C J,Slayback D A,Pinzon J E,et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999[J]. *International Journal of Biometeorology*,2001,45(4):184-190.

[7] 郑景云,葛全胜,郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响[J]. *科学通报*,2002(20):1582-1587.

Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X. Effects of global warming on plant phenological changes for the last 40 years in China[J]. *Chinese Science Bulletin*,2002(20):1582-1587.

[8] Maignan F,Bréon F M,Bacour C,et al. Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*,2008,112(2):496-505.

[9] 范德芹,赵学胜,朱文泉,等. 植物物候遥感监测精度影响因素

研究综述[J]. *地理科学进展*,2016,35(3):304-319.

Fan D Q,Zhao X S,Zhu W Q, et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data[J]. *Progress in Geography*,2016,35(3):304-319.

[10] Wu X C,Liu H Y. Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China,1982—2006[J]. *Global Change Biology*,2013,19(3):870-880.

[11] 刘玲玲,刘良云,胡勇. 1982—2006 年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析[J]. *地理科学进展*,2012,31(11):1433-1442.

Liu L L,Liu L Y,Hu Y. Assessment and intercomparison of satellite-derived start-of-season (SOS) measures in Eurasia for 1982—2006[J]. *Progress in Geography*,2012,31(11):1433-1442.

[12] Ge Q S,Dai J H,Cui H J, et al. Spatiotemporal variability in start and end of growing season in China related to climate variability[J]. *Remote Sensing*,2016,8(5):433.

[13] 高洪文. 生态交错带 (Ecotone) 理论研究进展[J]. *生态学杂志*,1994,13(1):32-38.

Gao H W. Advancement of theoretical research in Ecotone[J]. *Chinese Journal of Ecology*,1994,13(1):32-38.

[14] 朱芬萌,安树青,关保华,等. 生态交错带及其研究进展[J]. *生态学报*,2007(7):3032-3042.

Zhu F M, An S Q, Guan B H, et al. A review of ecotone: Concepts, attributes, theories and research advances[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2007(7):3032-3042.

[15] 高翔,白红英,张善红,等. 1959—2009 年秦岭山地气候变化趋势研究[J]. *水土保持通报*,2012,32(1):207-211.

Gao X, Bai H Y, Zhang S H, et al. Climatic change tendency in Qinling Mountains from 1959 to 2009[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*,2012,32(1):207-211.

[16] 邓晨晖,白红英,马新萍,等. 2000—2017 年秦岭山地植被物候变化特征及其南北差异[J]. *生态学报*,2021,41(3):1068-1080.

Deng C H, Bai H Y, Ma X P, et al. Variation characteristics and its north-south differences of the vegetation phenology by remote sensing monitoring in the Qinling Mountains during 2000—2017[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2021,41(3):1068-1080.

[17] 邓晨晖,白红英,高山,等. 1964—2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应[J]. *地理学报*,2018,73(5):917-931.

Deng C H, Bai H Y, Gao S, et al. Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling Mountains region during 1964—2015[J]. *Acta Geographica Sinica*,2018,73(5):917-931.

[18] 马新萍,白红英,贺映娜,等. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例[J]. *地理科学*,2015,35(12):1616-1621.

Ma X P, Bai H Y, He Y N, et al. The vegetation remote sensing phenology of Qinling Mountains based on NDVI and its response to temperature: Taking within the territory of Shaanxi as an example[J]. *Scientia Geographica Sinica*,2015,35(12):1616-1621.

[19] 夏浩铭,李爱农,赵伟,等. 2001—2010 年秦岭森林物候时空变化遥感监测[J]. *地理科学进展*,2015,34(10):1297-1305.

Xia H M, Li A N, Zhao W, et al. Spatiotemporal variations of forest phenology in the Qinling zone based on remote sensing monitoring, 2001—2010[J]. *Progress in Geography*,2015,34(10):1297-1305.

[20] 郭少壮,白红英,黄晓月,等. 秦岭太白红杉林遥感物候提取及

对气候变化的响应[J]. 生态学报,2019,38(4):1123-1132.

Guo S Z,Bai H Y,Huang X Y,et al. Remote sensing phenology of Larix chinensis forest in response to climate change in Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(4):1123-1132.

[21] 李建豪,陶建斌,程波,等. 秦岭山区植被春季物候的海拔敏感性[J]. 应用生态学报,2021,32(6):2089-2097.

Li J H,Tao J B,Cheng B,et al. Sensitivity of spring phenology to elevation in Qinling Mountains,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(6):2089-2097.

[22] 钟兆站,李克煌. 秦岭—黄淮平原交界带气候边际效应初探[J]. 地理研究,1996,15(4):66-73.

Zhong Z Z,Li K H. A primary study on the climatic boundary effect of the join zone between Qinling Mountain and Huanghuai Plain[J]. Geographical Research,1996,15(4):66-73.

[23] 管华,马建华. 秦岭—黄淮平原交界带土壤物质强淋溶效应分析[J]. 地域研究与开发,2008,27(3):117-120.

Guan H,Ma J H. Analysis of soil material strong leaching effect in the transitional region of Qinling Mountains and Huang-Huai Plain[J]. Areal Research and Development,2008,27(3):117-120.

[24] 何太蓉,庄红娟,刘存东. 秦岭—黄淮平原交界带中东部近 50 年气候变化特征与趋势[J]. 安徽农业科学,2009,37(14):6532-6534.

He T R,Zhuang H J,Liu C D. Characteristics and trend of climatic change in the east of transitional region between Qinling Mountains and Huanghuai Plain in recent 50 years[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2009,37(14):6532-6534.

[25] 王正兴,刘闯,Huete A. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报,2003,23(5):979-987.

Wang Z X,Liu C,Huete A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI advances in vegetation index research[J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(5):979-987.

[26] 项铭涛,卫炜,吴文斌. 植被物候参数遥感提取研究进展评述[J]. 中国农业信息,2018,30(1):55-66.

Xiang M T,Wei W,Wu W B. Review of vegetation phenology estimation by using remote sensing[J]. China Agricultural Informatics,2018,30(1):55-66.

[27] 何月,樊高峰,张小伟,等. 浙江省植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报,2013,28(2):220-233.

He Y,Fan G F,Zhan X W,et al. Vegetation phenological variation and its response to climate changes in Zhejiang Province[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(2):220-233.

[28] 李净,刘红兵,李彩云,等. 基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究[J]. 地理科学,2017,37(4):620-629.

Li J,Liu H B,Li C Y,et al. Changes of green-up day of vegetation growing season based on GIMMS 3g NDVI in Northern China in recent 30 years[J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(4):620-629.

[29] 宋春桥,游松财,柯灵红,等. 藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报,2012,32(4):1045-1055.

Song C Q,You S C,Ke L H,et al. Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(4):1045-1055.

[30] 李正国,唐华俊,杨鹏,等. 植被物候特征的遥感提取与农业应用综述[J]. 中国农业资源与区划,2012,33(5):20-28.

Li Z G,Tang H J,Yang P,et al. Progress in remote sensing of vegetation phenology and its application in agriculture[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2012,33(5):20-28.

[31] Jönsson P,Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(8):1824-1832.

[32] 武永峰,何春阳,马瑛,等. 基于计算机模拟的植物返青期遥感监测方法比较研究[J]. 地球科学进展,2005,20(7):724-731.

Wu Y F,He C Y,Ma Y,et al. The comparison of the current remote sensing-based vegetation greenup detection methods with the computer simulation[J]. Advances in Earth Science,2005,20(7):724-731.

[33] 李铮,柏延臣,何亚倩. 遥感叶面积指数产品提取自然植被物候期对比[J]. 遥感技术与应用,2015,30(6):1103-1112.

Li Z,Bo Y C,He Y Q. Comparison of natural vegetation phenology metrics from remote sensing LAI products[J]. Remote Sensing Technology and Application,2015,30(6):1103-1112.

[34] 侯学会,隋学艳,梁守真,等. 几种物候提取方法的小麦物候提取[J]. 遥感信息,2017,32(6):65-70.

Hou X H,Sui X Y,Liang S Z,et al. Comparison of five methods for phenology extraction of winter wheat[J]. Remote Sensing Information,2017,32(6):65-70.

[35] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等. 基于 NDVI 数据的华北地区耕地物候空间格局[J]. 中国农业科学,2009,42(2):552-560.

Wu W B,Yang P,Tang H J,et al. Monitoring spatial patterns of cropland phenology in North China based on NOAA NDVI data[J]. Scientia Agricultura Sinica,2009,42(2):552-560.

[36] 于信芳,庄大方. 基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学,2006(4):111-117.

Yu X F,Zhuang D F. Monitoring forest phenophases of northeast China based on MODIS NDVI data[J]. Resources Science,2006(4):111-117.

[37] 宋怡,马明国. 基于 GIMMS_AVHRR_NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J]. 遥感学报,2008,12(3):499-505.

Song Y,Ma M G. Variation of AVHRR NDVI and its relationship with climate in Chinese arid and cold regions[J]. Journal of Remote Sensing,2008,12(3):499-505.

[38] 李登科,王钊. 基于 MCD12Q2 的秦岭植被物候时空变化及对气候的响应[J]. 生态环境学报,2020,29(1):11-22.

Li D K,Wang Z. Spatiotemporal variation of vegetation phenology and its response to climate in Qinling Mountains based on MCD12Q2[J]. Ecology and Environmental Sciences,2020,29(1):11-22.

[39] 李丹,吴秀芹,张靖宙,等. 西南喀斯特断陷盆地植被物候动态变化及其与气候因子的响应[J]. 水土保持研究,2020,27(6):168-173.

Li D,Wu X Q,Zhang J Z,et al. Vegetation phenology change and response to climate change in the Karst faulted basin of Southwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(6):168-173.

[40] 陈丽,杨秋萍,徐长春,等. 2001—2017 年开都—孔雀河流域植被物候特征及其对气候变化的响应[J]. 干旱区研究,2020,37(3):729-738.

Chen L,Yang Q P,Xu C C,et al. Phenological characteristics of

vegetation and its response to climatic change in the Kaidu—Kongqi River basin, Xinjiang, during 2001—2017[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(3): 729–738.

[41] 李 叶, 张艳红, 陈子琦, 等. 中高纬度山区气温空间化的方法比较研究——以大兴安岭北麓为例[J]. *山地学报*, 2021, 39(2): 174–182.

Li Y, Zhang Y H, Chen Z Q, et al. Comparative study on spatialization methods of air temperature in middle and high latitude mountainous areas: A case study of northern foot of the Daxing'anling Mountains[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(2): 174–182.

[42] 张晓东, 朱文博, 张静静, 等. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 41–53.

Zhang X D, Zhu W B, Zhang J J, et al. Phenology of forest vegetation and its response to climate change in the Funiu Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 41–53.

[43] 侯学会, 隋学艳, 姚慧敏, 等. 中国北方麦区冬小麦物候期对气候变化的响应[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(2): 202–209.

Hou X H, Sui X Y, Yao H M, et al. Response of winter phenology to climate in northern China[J]. *Journal of Triticeae Crop*, 2019, 39(2): 202–209.

[44] 崔耀平, 肖登攀, 刘素洁, 等. 中国夏玉米和冬小麦近年生育期变化及其与气候的关系[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(3): 388–396.

Cui Y P, Xiao D P, Liu S J, et al. Growth periods variation of summer maize and winter wheat and their correlations with hydrothermal conditions in recent years in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(3): 388–396.

[45] 孙新素, 龙致炜, 宋广鹏, 等. 气候变化对黄淮海地区夏玉米—冬小麦种植模式和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(13): 2476–2487.

Sun X S, Long Z W, Song G P, et al. Effects of climate change on cropping pattern and yield of summer maize – winter wheat in Huang – Huai – Hai Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2476–2487.

Remote sensing monitoring and analysis of the vegetation phenological characteristics of the Qinling Mountains – Huanghuai Plain ecotone from 2002 to 2020

WANG Yating¹, ZHU Changming¹, ZHANG Tao², ZHANG Xin³, SHI Zhiyu¹

(1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China; 2. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha, 410600, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Vegetation phenology shows non – linear and regionally different responses to global changes. Typical differences exist in the climates between the north and the south of the Qinling Mountains. Accordingly, this study investigated the Qinling Mountains – Huanghuai Plain ecotone zone. Based on the MOD09Q1 remote sensing data from 2002 to 2020, this study extracted key parameters of the phenological characteristics of the Qinling Mountains – Huaihe Plain ecotone zone using the adaptive dynamic threshold method. Then, it described in detail the spatio – temporal change process of vegetation phenology in the study area to reveal the spatio – temporal differentiation characteristics. Furthermore, the responses of vegetation phenology to climate changes in the study area were analyzed by combining the temperature data. The study results show that: Significant spatial differentiation characteristics of vegetation phenology existed in the Qinling Mountains – Huanghuai Plain ecotone. Both the start of the growing season (SOS) and the end of the growing season (EOS) of the forest vegetation were later than those of farmland vegetation. Specifically, the SOS and EOS were Day 67 – Day 116 and Day 280 – Day 340 for forest vegetation and were Day 49 – Day 92 and Day 195 – Day 328 for farmland vegetation. The length of the growing season (LOS) was 215 ~ 262 days for forest vegetation and was 147 ~ 261 days for farmland vegetation. In addition, the forest vegetation phenology was affected by altitude. A higher altitude corresponds to a later SOS and an earlier EOS. From 2002 to 2020, the Qinling Mountains – Huaihe Plain ecotone zone generally had early SOS and EOS and shortened LOS. The changing trends of SOS and EOS were $-0.14\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ and $-0.78\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively for forest vegetation and $0.1\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ and $-1.43\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively for farmland vegetation. The vegetation phenological characteristics of the Qinling Mountains – Huaihe Plain ecotone were significantly correlated with regional temperature, especially the temperatures in March and September. The analysis of the data from the existent observation sites shows that the rising temperature advanced the regional phenophases.

Keywords: vegetation phenology; Qinling Mountains – Huanghuai Plain; ecotone; spatio – temporal change; remote sensing

(责任编辑: 陈 理)