

1964-2015年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应

邓晨晖^{1,2}, 白红英^{1,2}, 高山³, 黄晓月^{1,2}, 孟清^{1,2}, 赵婷^{1,2},
张 扬^{1,2}, 苏 凯^{1,2}, 郭少壮^{1,2}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127;
3. 西安市气象局, 西安 710016)

摘要: 以1964-2015年物候观测数据和逐日气象资料为基础, 运用相关分析和PLS回归法, 研究了秦岭地区植物物候变化与气候变化的响应关系。结果表明: ① 1964-2015年, 秦岭地区物候始末期的气候均呈干暖化趋势, 且始期的暖化趋势较末期显著, 物候突变后(1985年之后)尤为显著。② 就单一因素而言, 物候始末期对气温、降水、日照等气候因子的响应程度存在差异, 突变前(1985年之前), 除物候始期的日均温外, 其他气候因子对物候的影响均不显著, 但突变后影响显著, 始期与末期的日均温每升高1℃, 始期提前3.0 d, 末期推迟12.0 d; 始期的累积降水每减少1 mm 始期提前1.3 d, 末期的每增加1 mm 末期推迟1.0 d; 始期与末期的日均日照时数每增加1 h, 始期提前4.3 d, 末期推迟18.3 d。③ 气候因子对物候始末期的影响存在滞后效应, 物候始期, 气温影响的滞后时效约1~2个月, 降水的滞后时效约1~3个月, 而日照几乎无滞后效应; 物候末期, 气温的滞后时效约1~3个月, 降水几乎无滞后效应, 而日照影响的滞后时效约1~2个月。④ 物候始期与末期均受气温、日照、降水的综合影响, 气温是影响物候变化最重要的因素, 特别是同期日均温的升高对物候始期的提前及末期的推迟具有主导控制作用。

关键词: 气候变化; 物候变化; 综合影响; 时滞效应; 秦岭地区

DOI: 10.11821/dlxb201805011

1 引言

IPCC第五次评估报告指出, 近130年(1880-2012年)全球升温0.85℃, 近30年(1983-2012年)极有可能是史上最热, 气候系统的暖化是毋庸置疑的^[1]。植物物候是表征植被—气候相互关系变化的重要指标之一^[2-3], 对全球气候波动非常敏感。作为陆面过程模型及全球碳循环的重要参数, 植被物候变化可以为全球环境变化提供有力证据^[4-6]。因此, 植物物候成为目前全球气候评价与自然环境变化的重要指标^[7-8]。

目前有关植物物候与气候变化的响应关系研究发现, 植物物候对气温、降水和日照等气候因素有不同程度的响应^[9-13]。大量研究分析了温度对植物物候的影响, 国际物候园资料显示, 欧洲早春变暖1℃将导致生长季提前7 d, 年均温增加1℃将导致生长季延长5 d^[4]。德国植物物候资料研究发现, 春季温度每上升1℃物候提前2.5~6.7 d, 生长季延长2.4~3.5 d, 秋季物候也受温度影响^[15]。在中国, 张福春^[16]论证了气温是影响植物物候

收稿日期: 2017-04-06; 修订日期: 2018-01-24

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304309) [Foundation: National Forestry Public Welfare Industry Scientific Research Project, No.201304309]

作者简介: 邓晨晖(1984-), 女, 陕西蒲城人, 博士, 主要从事植被与气候变化研究。E-mail: chenhuishnow@126.com

通讯作者: 白红英(1962-), 女, 陕西凤翔人, 博士, 教授, 主要从事全球变化生态学、自然地理学等方面的科研与教学。E-mail: hongyingbai@163.com

的主要因子;Chen等^[17]认为中国温带地区日均温升高1℃,春季生长季开始日期提前3.1 d,秋季生长季结束日期延迟2.6 d;张学霞等^[18]认为物候期的提前与推迟对温度增高与降低的响应是非线性的。亦有学者发现,气温随纬度、经度和海拔的规律性变化而导致物候变化具有随经度、纬度及海拔变化的推移性,霍普金斯定律指出,在其他因素相同的条件下,北美洲温带纬度每向北移1°,经度向东移5°或升高121.92 m,植物发育在春天和初夏各延期4 d,在晚夏和秋天则提前4 d。Walther等^[19]发现,近30年来气候变暖对植物物候、植物沿纬度和垂直方向的分布变化以及植物之间相互作用过程等都有明显影响。此外,一些学者认为降水也是影响植物生长发育的重要气候因子。在多数地区,植物物候对降水变化响应敏感^[20-26],在干旱和半干旱地区,植物物候首先受可用水控制^[27-30],即便在水分充足的地区,降水也会影响植物物候^[31]。再者,光照对物候变化亦有重要影响^[32-33],有时光的影响比温度的影响还重要^[34],一些物种的物候期主要是受光周期条件控制,而温度只是在植物满足临界日照长度后对植物生长起到一定的调节作用^[35]。综上,以往学者的研究更多地考虑了单一气象因素对物候期的影响,且侧重于气温影响的研究,而植物物候变化是气温、降水、日照等多因子综合影响的结果。

秦岭被称为中国地理的自然标识,是中国南北地理分界线与气候分界线,也是中国中部地区生态环境的过渡地带及敏感区,亦是气候变化区域响应的敏感区。近50多年来,秦岭地区气温上升趋势显著,自20世纪80年代以来尤为明显^[36]。那么,在全球变暖的背景下,秦岭物候始期与末期的气候发生了怎样的变化?植物物候与气候变化的响应关系如何,是否存在滞后效应?各气候因子对物候始期与末期影响的贡献都是怎样的?影响该地区植物物候变化的主导气候因子又是什么?本文基于1964-2015年物候观测数据和逐日气温、降水、日照时数等气象数据,研究了秦岭地区植物物候变化对气候变化的响应关系,旨在揭示气候变化对秦岭生态系统的影响,监测生态系统对全球环境变化的响应程度,为深刻认识秦岭地区植被—气候相互作用机制提供科学基础。

2 研究区概况

本文以狭义的秦岭为研究区,即秦岭腹地,位于陕西省南部,渭河以南,汉江以北,东西以陕西省省界为界(图1)。研究区位于105°30'E~110°05'E、32°40'N~34°35'N,总面积约6.19万km²,约占陕西省总土地面积的30%,海拔高度范围195~3771.2 m,北坡陡短,南坡缓长。秦岭南北气候差异明显,表现为北干南湿,北坡属于暖温带半湿润半干旱气候,广布暖温带针阔混交林与落叶阔叶林;南坡为北亚热带湿润气候,以常绿落叶阔叶混交林为基带。秦岭地区水热组合条件较好,素有“国家绿肺”之称。

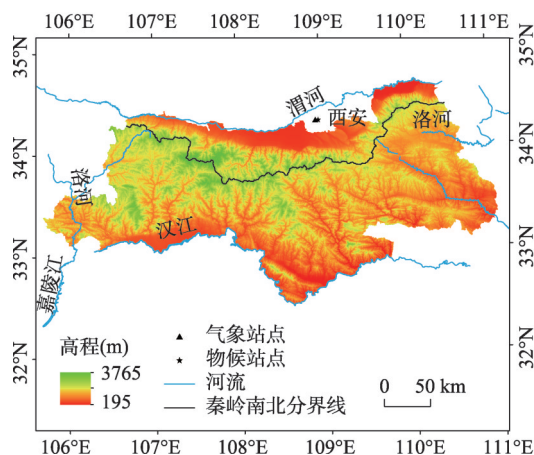


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

3 数据与方法

3.1 研究数据

3.1.1 物候数据来源 受秦岭地区地面物候观测站缺少的限制,本文采用中国物候观测网

中秦岭区域内唯一的物候观测站西安站 1964-2015 年 7 种木本植物 (毛白杨、山桃、紫荆、垂柳、构树、刺槐、桑树) 的物候观测资料, 数据来源于国家地球系统科学数据共享平台 (www.geodata.cn) 及西安植物园。

3.1.2 气象数据来源 所采用的气象数据是与物候观测站临近的气象台站西安站 1964-2015 年的逐日平均气温、降水量、日照时数等数据, 数据来源于中国气象数据科学共享服务网 (www.geodata.cn) 和西安市气象局。

3.1.3 物候数据选取与处理 采用年序日 (Day of Year, DOY) 表示物候期出现的时间, 即以当年 1 月 1 日开始的实际日数, 得到物候期的时间序列。在物候期的选取上, 为了与后期研究以遥感监测所表征的生长季始期 (返青期) 和末期 (枯黄期) 相对应, 故将“展叶盛期”和“叶全部变色期”分别作为研究的“物候始期”和“物候末期”。

由 7 个树种物候期数据统计^[37]知, 物候始期出现在第 67~122 d (3-4 月), 末期出现在第 281~346 d (10-12 月上旬), 并结合研究区物候始期与末期的气候特点, 本文选取距离 1 月 1 日第 60~122 d 作为物候始期时段, 第 274~346 d 作为物候末期时段。分别计算每年 7 个树种物候始期与末期的均值, 作为物候始末期发生日, 以此表示该年秦岭地区的物候始期与末期。此外, 根据 7 个树种物候始期末期序列的突变分析^[37]得出, 始期突变发生于 1985 年, 末期突变发生于 1984 年, 本文以 1985 年作为物候始末期的突变年份。

对于数据记录中断或缺失年份 1966 年、1969-1972 年、1989 年、1992 年均不做处理。

3.2 研究方法

本文采用偏最小二乘回归法 (PLS) 研究气候因子对物候始末期的综合影响。该方法兼具主成分分析和多元回归分析的优点, 克服了众多自变量间多元共线性问题^[38], 其分析建模的步骤见文献^[39]。该方法可得到一个重要判别指标——变量投影重要性 (VIP) 值, 根据 VIP 值确定在具有多重共线的不同自变量中, 哪些是对因变量最具有解释意义的自变量。VIP 值越大其解释意义越显著, 一般认为, $VIP > 1$ 具有显著解释意义; $0.8 < VIP < 1$ 具有中等程度解释意义; $VIP < 0.8$ 基本不具备解释意义^[40]。其计算公式^[41]:

$$VIP_j = \left\{ p \sum_{h=1}^m \sum_k R^2(y_k, t_h) w_{hj}^2 / \sum_{h=1}^m \sum_k R^2(y_k, t_h) \right\}^{1/2} \quad (1)$$

式中: p 为自变量个数; m 为提取的成分个数; k 为因变量 ($k = 1$); t_h 为自变量的第 h 个成分; $R^2(y_k, t_h)$ 为 y_k 与 t_h 间相关系数的平方; w_{kj}^2 为自变量 x_j 对构造 t_h 成分的贡献权重。

PLS 模型拟合参数中, $R^2 X(cum)$ 表示所拟合的 PLS 模型对自变量的信息利用率, $R^2 Y(cum)$ 表示 PLS 模型对因变量的解释能力, $Q^2(cum)$ 为累计交叉有效性, 表示 PLS 模型对数据的预测准确性, $Q^2(cum) > 0.5$ 表示模型预测准确度较高, $Q^2(cum) < 0.05$ 时, 表示模型没有显著意义^[38]。文中因变量分别为物候始期与末期, 自变量考虑了相关的气候因子, 试图分析各自变量对因变量影响的重要性, 以寻求影响研究区植物物候始期与末期变化的决定性因子。

4 结果与分析

4.1 1964-2015 年秦岭地区物候始末期气候变化特征

4.1.1 气温变化特征 图 2 和表 1 为 1964-2015 年秦岭地区物候始末期及物候突变前后的日均气温变化趋势。图 2 和表 1 显示, 1964-2015 年, 始期气温上升速率达 $0.77\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($P < 0.01$), 约上升了 $3.90\text{ }^{\circ}\text{C}$; 末期气温上升速率为 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($P < 0.01$), 约上升了 $2.08\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即物候始期与末期的气温均呈极显著上升趋势, 且始期气温的变化速率高于末

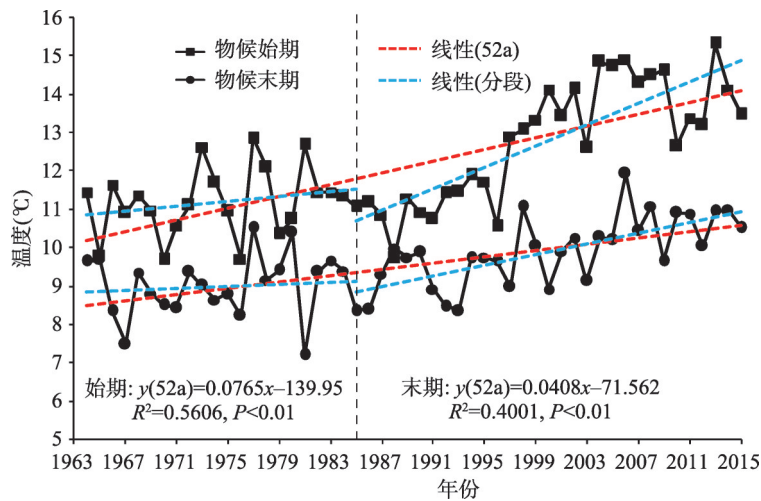


图2 1964-2015年秦岭地区物候始末期与物候突变前后的日均气温变化趋势

Fig. 2 Changing trends of daily average temperature at the start and the end of plant phenophases before and after the phenophase abrupt change in Qinling Mountains region during 1964-2015

表1 1985年前后秦岭地区物候始末期的日均气温变化

Tab. 1 Changing trends of daily average temperature at the start and the end of plant phenophases in Qinling Mountains region around 1985

| | 突变前 | R ² 及显著性 | 突变后 | R ² 及显著性 |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 物候始期 | $y=0.0327x-53.265$ | $R^2=0.0567$ | $y=0.1406x-268.32$ | $R^2=0.6625^{**}$ |
| 物候末期 | $y=0.0138x-18.229$ | $R^2=0.0119$ | $y=0.0695x-129.09$ | $R^2=0.4746^{**}$ |

注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

期。突变前,始期气温呈不显著的上升趋势,速率为0.33℃/10a;末期气温亦呈不显著的上升趋势,速率为0.14℃/10a。突变后,始期升温率达1.41℃/10a($P < 0.01$),末期为0.70℃/10a($P < 0.01$),即物候突变后,无论是始期还是末期气温均呈极显著上升趋势,且始期气温变化较末期更为显著,变化速率更快。

4.1.2 降水变化特征 图3和表2为1964-2015年秦岭地区物候始末期及物候突变前后的日均降水量变化趋势。1964-2015年,始期降水减少速率为0.13mm/10a($P < 0.05$),约减少0.66mm;末期降水减少速率为0.05mm/10a,约减少了0.25mm,即物候始期与末期的降水均呈减少趋势,且始期降水呈显著减少趋势,末期降水波动性大且变化不显著。突变前,始期降水呈显著减少趋势,速率为0.45mm/10a($P < 0.05$);末期降水呈不显著减少趋势,速率为0.04mm/10a。突变后,始期降水呈不显著减少趋势,速率为0.01mm/10a;末期降水亦呈不显著减少趋势,速率为0.09mm/10a,即物候突变后,始期和末期降水均呈不显著减少趋势,且末期降水变化较始期明显,波动性大,变化速率快。

4.1.3 日照时数变化特征 图4和表3为1964-2015年秦岭地区物候始末期及物候突变前后的日均日照时数变化趋势。1964-2015年,始期日照时数增加速率为0.02h/10a,约增加了0.09h;末期日照时数减少速率0.24h/10a($P < 0.05$),约减少了1.21h,即物候始期日照时数变化不明显,而末期呈显著减少趋势。突变前,始期与末期的日照时数均呈减少趋势,始期的速率为0.47h/10a,末期的速率为0.78h/10a($P < 0.05$)。突变后,始期与末期的日照时数均呈增加趋势,始期的速率为1.0h/10a($P < 0.01$),末期的速率为0.46h/10a($P < 0.05$),即物候突变后,无论是物候始期还是末期,日照时数均由突变前的减少趋势转变为显著的增加趋势,且始期日照变化速率高于末期,达到极显著水平。

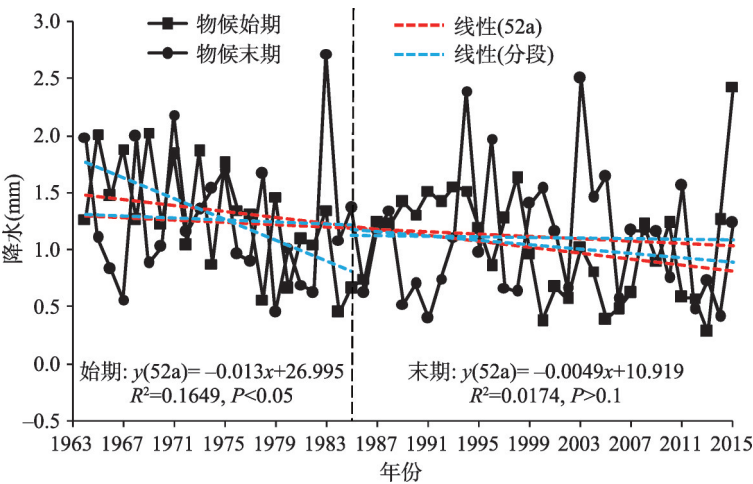


图3 1964-2015年秦岭地区物候始末期与物候突变前后的日均降水量变化趋势

Fig. 3 Changing trends of daily average precipitation at the start and the end of plant phenophases before and after the phenophase abrupt change in Qinling Mountains region during 1964-2015

表2 1985年前后秦岭地区物候始末期的日均降水量变化

Tab. 2 Changing trends of daily average precipitation at the start and the end of plant phenophases in Qinling Mountains region around 1985

| | 突变前 | R^2 及显著性 | 突变后 | R^2 及显著性 |
|------|---------------------|----------------|---------------------|--------------|
| 物候始期 | $y=-0.0454x+90.891$ | $R^2=0.3904^*$ | $y=-0.0012x+3.415$ | $R^2=0.0004$ |
| 物候末期 | $y=-0.0039x+8.9077$ | $R^2=0.0019$ | $y=-0.0095x+20.102$ | $R^2=0.0339$ |

注：*： $P < 0.05$ ；**： $P < 0.01$ 。

4.2 单一气候因素对秦岭地区物候始末期的影响

4.2.1 气温与物候始末期的关系及滞后性 (1) 1964-2015年秦岭地区物候始末期与同期日均气温的变化趋势如图5所示。1964-2015年，始期与同期日均温呈极显著负相关 ($R = -0.691$, $P < 0.01$)；而末期与其呈极显著正相关 ($R = 0.700$, $P < 0.01$)。即物候始期随气温的升高而提前，物候末期随气温的升高而推迟。突变前，同期日均温与始期呈显著负相关，而与末期的相关性不显著。突变后，同期日均温与始期呈极显著负相关，而与末期呈极显著正相关，且与始期的相关性高于末期，即物候突变后，同期日均温对物候始期的提前和末期的推迟均有显著影响，且对始期的影响较末期更为显著。

根据作者前期研究结果^[37]可知，突变前，物候始期与末期均表现出提前趋势，始期与末期的速率分别为0.04 d/10 a、4.6 d/10 a。突变后，物候始期提前速率4.3 d/10 a，物候末期推迟速率8.4 d/10 a；始期与末期的日均温上升速率分别为1.41 ℃/10 a、0.70 ℃/10 a，即始期的日均温每升高1 ℃，始期提前3.0 d，而末期的日均温每升高1 ℃末，期推迟12.0 d，表明突变后的气温强烈变化引起物候的显著变化。

(2) 物候始末期与临界温度的关系。植物物候反映了过去一段时间气候条件的累积对植物生长发育的综合影响^[42]，积温可能对木本植物开始生长起着至关重要的作用^[43-44]，植物只有满足一定的热量需求才能正常生长。为了更好地寻求真正具有生态学意义的热量变化规律，采用气象学意义上对植物生长具有直接作用的热量指标——有效温度，依次分析物候始期与有效积温 ($\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的相关性，以寻求研究区植物展叶盛期所需的最适温。经相关分析发现，物候始期与 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温的相关性最为显著，说明植物展叶盛期与积温有显著关系， $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温是反映植物展叶盛

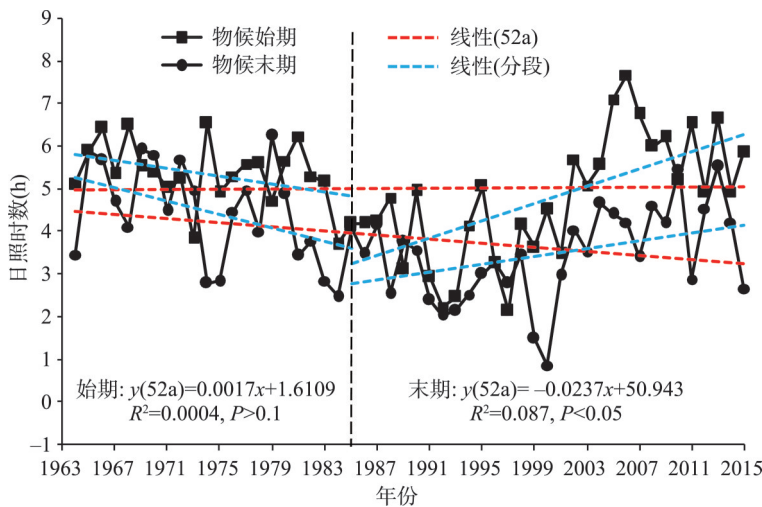


图4 1964-2015年秦岭地区物候始末期与物候突变前后的日均日照时数变化趋势

Fig. 4 Changing trends of daily average sunshine hours at the start and the end of plant phenophases before and after the phenophase abrupt change in Qinling Mountains region during 1964-2015

表3 1985年前后秦岭地区物候始末期的日均日照时数变化

Tab. 3 Changing trends of daily average sunshine hours at the start and the end of plant phenophases in Qinling Mountains region around 1985

| | 突变前 | R^2 及显著性 | 突变后 | R^2 及显著性 |
|------|---------------------|----------------|--------------------|-------------------|
| 物候始期 | $y=-0.0467x+97.506$ | $R^2=0.1560$ | $y=0.1006x-196.47$ | $R^2=0.3999^{**}$ |
| 物候末期 | $y=-0.0782x+158.76$ | $R^2=0.1942^*$ | $y=0.0458x-88.089$ | $R^2=0.1475^*$ |

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

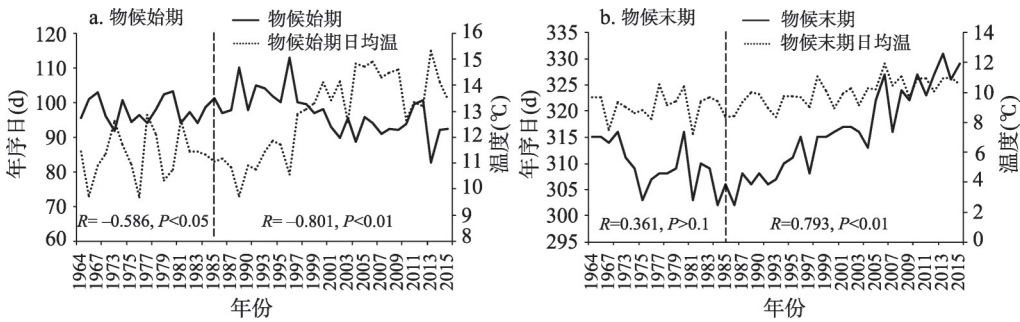


图5 1964-2015年秦岭地区物候始末期与同期日均温的变化趋势

Fig. 5 Changing trends of daily average temperature at the start and the end of plant phenophases in Qinling Mountains region during 1964-2015.

期所需热量的敏感指标。由此推定,研究区植物展叶盛期所需的低温阈值为10℃。

图6为1964-2015年秦岭地区物候始期与同期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温的变化趋势。1964-2015年, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温呈增加趋势,物候始期呈提前趋势,二者呈显著负相关($R = -0.316$, $P < 0.05$),即物候始期随同期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温的增加而提前。突变前,二者的相关性不显著,而突变后,二者的相关性达到了显著水平。

确定了所研究的物候始期低温阈值后,进一步引入有效温度起始日的概念,即为每年自第1天始连续5日日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 所对应的年序日。图7a为1964-2015年秦岭地区物候始期与有效温度起始日的变化趋势。1964-2015年,物候始期与有效温度起始日二者

呈极显著正相关 ($R = 0.753$, $P < 0.01$), 且物候突变后二者的相关性较突变前更显著, 说明 10°C 是研究区植物展叶盛期的敏感温度。

同理, 物候末期引入有效温度结束日的概念, 即为每年第274天起连续5日日平均气温小于等于临界高温所对应的年序日。根据物候末期时段的温度特征, 依次分析物候末期与每年自第274天起连续5日均温 $\leq 8^{\circ}\text{C}$ 、 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 、 $\leq 12^{\circ}\text{C}$ 稳定出现日期的相关性, 由此得出物候末期与 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 有效温度结束日相关性最为显著。由此推定, 研究区植物结束生长的高温阈值为 10°C 。

图7b为1964-2015年物候末期与 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 有效温度结束日的变化趋势。物候末期的变化趋势与有效温度结束日二者呈极显著正相关 ($R = 0.620$, $P < 0.01$), 且物候突变后二者的相关性较突变前更显著, 表明 10°C 是研究区植物结束生长的临界温度。

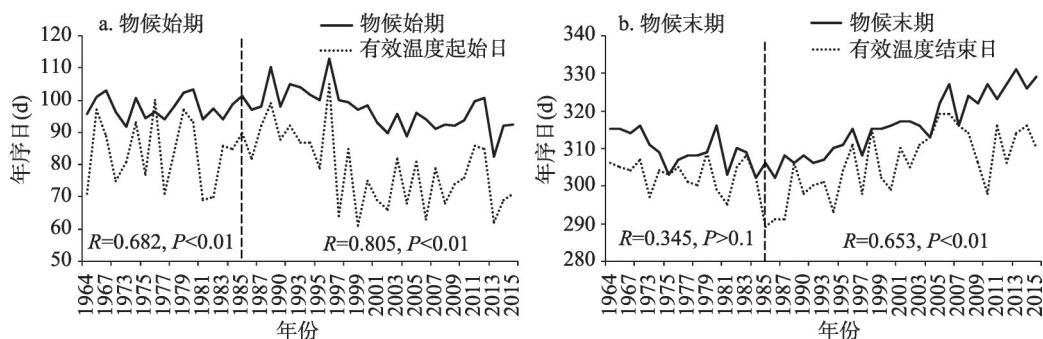


图7 1964-2015年秦岭地区物候始期与同期有效温度起始日、物候末期与同期有效温度结束日变化趋势

Fig. 7 Changing trends of the start (end) of plant phenophases and the effective temperature starting (ending) date for the same period in Qinling Mountains region during 1964-2015

(3) 物候始末期与前期有效积温的关系及滞后性。表4为物候始末期与前期各时段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温的相关性。秦岭地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温始于2月, 物候始期与自2月始 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温二者呈显著负相关, 即随着早春气温回升, 物候始期随之相应提前; 气温对物候始期的影响滞后时效约为1~2个月, 随着气温上升, 滞后效应减弱, 且物候突变后, 滞后效应加强。无论是在52年尺度上还是物候突变后, 物候末期均与自8月始前期各时段 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温呈极显著正相关, 即前期有效积温对物候末期的推迟均有影响, 其滞后时效约1~3月; 而物候突变前二者的相关性并不显著, 但物候突变后尤为显著, 存在明显的累加效应。

4.2.2 降水与物候始末期的关系及滞后性 经统计分析发现, 物候始末期与同期日均降水量的相关性均不显著, 而与前期累积降水量存在相关性。

表5为物候始末期与前期各时段累积降水的相关性。物候始期与自1月始各时段的累积降水均呈显著正相关, 即物候始期存在1~3个月的滞后效应, 始期随前期累积降水的增加而推迟, 随累积降水的减少而提前。这可能与早春的降水量较少有关, 而进入3月

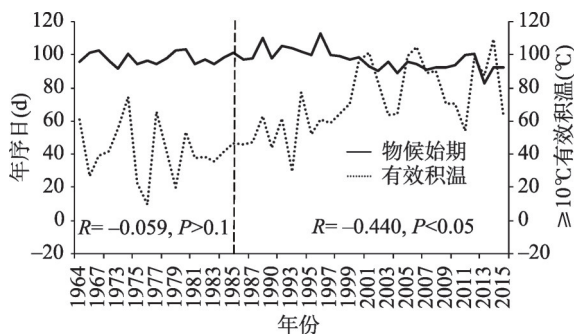


图6 1964-2015年秦岭地区物候始期与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温的变化趋势

Fig. 6 Changing trends of the start of plant phenophases and the $\geq 10^{\circ}\text{C}$ effective accumulated temperature in Qinling Mountains region during 1964-2015

表 4 秦岭地区物候始末期与前期≥ 10 ℃有效积温的相关关系

Tab. 4 Correlations of the start and the end of plant phenophases to the early ≥ 10 ℃ effective accumulated temperature in Qinling Mountains region

| 不同时段始~物候 始期发生日 | 物候始期 | | | 不同时段始~物候 末期发生日 | 物候末期 | | |
|-------------------|---------|--------|----------|-------------------|---------|-------|---------|
| | 52 年 | 突变前 | 突变后 | | 52 年 | 突变前 | 突变后 |
| | | | | 8 月(第 213 天)~ | 0.609** | 0.173 | 0.606** |
| 2 月(第 32 天)~ | -0.338* | -0.076 | -0.474** | 9 月(第 244 天)~ | 0.626** | 0.232 | 0.611** |
| 3 月上旬(第 60 天)~ | -0.316* | -0.059 | -0.440* | 10 月上旬(第 274 天)~ | 0.647** | 0.220 | 0.694** |
| 3 月中旬(第 70 天)~ | -0.205 | -0.018 | -0.273 | 10 月中旬(第 284 天)~ | 0.600** | 0.142 | 0.664** |
| 3 月下旬(第 80 天)~ | 0.149 | 0.162 | 0.203 | 10 月下旬(第 294 天)~ | 0.570** | 0.315 | 0.559** |

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

表 5 秦岭地区物候始末期与前期累积降水的相关关系

Tab. 5 Correlations of the start and the end of plant phenophases to the early accumulated precipitation in Qinling Mountains region

| 不同时段始~物候 始期发生日 | 物候始期 | | | 不同时段始~物候 末期发生日 | 物候末期 | | |
|-------------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|--------|--------|
| | 52 年 | 突变前 | 突变后 | | 52 年 | 突变前 | 突变后 |
| 1 月(第 1 天)~ | 0.445** | 0.547* | 0.405* | 8 月(第 213 天)~ | 0.164 | -0.060 | 0.351 |
| 2 月(第 32 天)~ | 0.451** | 0.571* | 0.411* | 9 月(第 244 天)~ | 0.077 | 0.031 | 0.303 |
| 3 月上旬(第 60 天)~ | 0.550** | 0.621** | 0.528** | 10 月上旬(第 274 天)~ | 0.075 | 0.301 | 0.020 |
| 3 月中旬(第 70 天)~ | 0.516** | 0.587* | 0.489** | 10 月中旬(第 284 天)~ | 0.156 | 0.294 | -0.033 |
| 3 月下旬(第 80 天)~ | 0.560** | 0.714** | 0.551** | 10 月下旬(第 294 天)~ | 0.405** | 0.279 | 0.423* |

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

份以后随着降水量的增多,使得气温降低,进而抑制植物生长,使得物候始期推迟。物候突变前后二者的相关性均显著,这与突变前后降水的变化趋势一致,进一步说明降水减少亦是影响物候始期提前的重要因素。物候末期仅与接近末期的累积降水有显著正相关关系,即物候末期的滞后效应不明显,末期随接近末期累积降水量的增多而推迟。这可能是因为接近物候末期降水量的增加,有效地补充了植物体内的水分,而有利于促进物候末期的推迟。因此,末期降水的增加有利于促进末期延长,而干旱则会导致末期提前。

经统计,突变后,自第 80 天至物候始期的累积降水呈不显著的减少趋势,速率为 3.12 mm/10 a;自 294 天至物候末期的累积降水呈显著的增加趋势,速率为 9.56 mm/10 a,即始期累积降水每减少 1 mm 始期提前 1.3 d,末期累积降水每增加 1 mm 末期推迟 1.0 d。

4.2.3 日照与物候始末期的关系及滞后性 (1) 物候始末期与同期日均日照时数的关

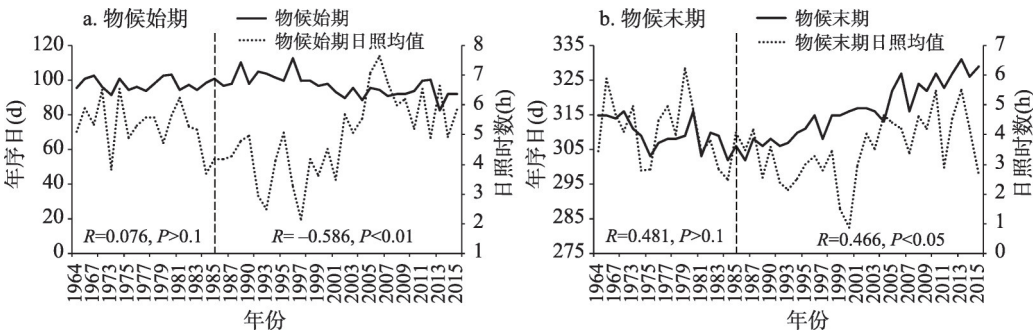


图 8 1964-2015 年秦岭地区物候始末期与同期日均日照时数的变化趋势

Fig. 8 Changing trends of daily average sunshine duration at the start and the end of plant phenophases in Qinling Mountains region during 1964-2015

系。图 8 为 1964-2015 年物候始末期与同期日均日照时数的变化趋势。图 8 显示, 1964-2015 年, 始期与同期日均日照时数二者呈极显著负相关 ($R = -0.456, P < 0.01$); 而末期与其呈弱正相关 ($R = 0.291, P < 0.1$), 即物候始期随日照时数的增加而提前, 物候末期随日照时数的增加而推迟。突变前, 二者的相关性均不显著; 突变后, 同期日均日照时数与始期呈极显著负相关, 而与末期呈显著正相关, 且始期的相关性高于末期, 即物候突变后, 同期日均日照时数对物候始期的提前和末期的推迟均有显著影响, 且对始期的影响较末期更为显著。由此可见, 光照也是影响物候始末期提前与推迟的重要因素, 光照充足, 始期提前, 末期推迟。经统计, 突变后, 始期与末期的日均日照时数每增加 1 h, 始期提前 4.3 d; 末期推迟 18.3 d。

(2) 物候始末期与前期累积日照时数的关系及滞后性。表 6 为物候始末期与前期各时段累积日照时数的相关性。表 6 显示, 物候始期仅与自 3 月下旬始至物候始期发生日的累积日照时数有显著正相关关系, 即物候始期随累积日照时数的减少而提前, 反之则推迟。这一结果似乎与实际不符, 早春日照的延长, 可以增加光合作用, 有利于植物提早开始生长和加快植物生长发育的速度, 也有学者研究结论得出春季物候期随着累积日照时数的增加而提前^[45], 但是在秦岭山地, 由于春季干旱少雨^[36], 日照增加, 温度上升将进一步导致植物缺水, 从而使得物候始期推迟。就物候末期而言, 无论是在 52 年尺度上还是物候突变后, 其均与自 9 月始各时段的累积日照时数呈正显著相关, 物候突变后更为显著, 即物候末期随日照时数的延长而推迟; 其滞后时效约为 1~2 个月, 且突变后滞后效应加强。

表 6 秦岭地区物候始末期与前期累积日照时数的相关关系

Tab. 6 Correlations of the start and the end of plant phenophases to the early accumulated sunshine duration in Qinling Mountains region

| 不同时段始~物候 始期发生日 | 物候始期 | | | 不同时段始~物候 末期发生日 | 物候末期 | | |
|-------------------|---------|---------|--------|-------------------|---------|---------|---------|
| | 52 年 | 突变前 | 突变后 | | 52 年 | 突变前 | 突变后 |
| 1 月(第 1 天)~ | -0.015 | 0.370 | -0.023 | 8 月(第 213 天)~ | 0.261 | 0.572* | 0.254 |
| 2 月(第 32 天)~ | 0.011 | 0.348 | -0.147 | 9 月(第 244 天)~ | 0.399** | 0.530* | 0.417* |
| 3 月上旬(第 60 天)~ | 0.071 | 0.460 | -0.069 | 10 月上旬(第 274 天)~ | 0.568** | 0.501* | 0.674** |
| 3 月中旬(第 70 天)~ | 0.161 | 0.516* | 0.048 | 10 月中旬(第 284 天)~ | 0.614** | 0.560* | 0.731** |
| 3 月下旬(第 80 天)~ | 0.425** | 0.635** | 0.377* | 10 月下旬(第 294 天)~ | 0.699** | 0.635** | 0.739** |

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

4.3 气候因子对秦岭地区物候始末期的综合影响效应

由以上各单一因子与物候始末期的相关性分析可知, 气温、降水、日照是影响物候始末期变化的重要因素, 且突变后的影响表现得更为显著, 进一步分析物候突变后三大气候因素对物候始末期的综合影响。

4.3.1 气候因子对物候始期的综合影响 表 7 为秦岭地区物候始期各影响因子的相关系数矩阵。其中, 自变量为同期日均气温、自 2 月始 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温、自 3 月始累积降水, 及同期日均日照时数等 4 个影响因子, 因变量为物候始期。由表 7 可知, 各变量间存在不同程度的强相关性, 满足 PLS 回归法建模的前提条件。

表 7 秦岭地区物候始期影响因子的相关系数矩阵

Tab. 7 Correlation coefficient matrix of influencing factors at the start of plant phenophases in Qinling Mountains region

| | 日均气温 | 有效积温 | 累积降水 | 日均日照 | 物候始期 |
|------|-------|---------|---------|----------|----------|
| 日均气温 | 1.000 | 0.716** | -0.431* | 0.629** | -0.801** |
| 有效积温 | | 1.000 | -0.428* | 0.485** | -0.470** |
| 累积降水 | | | 1.000 | -0.472** | 0.549** |
| 日均日照 | | | | 1.000 | -0.587** |
| 物候始期 | | | | | 1.000 |

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

图9为物候始期PLS结果。*VIP*直方图显示,各因子的*VIP*值大小排序依次为始期的日均气温(1.28)>有效积温(0.96)>日均日照(0.88)>累积降水(0.81),即影响因子对物候始期的解释能力依次是:始期的日均气温>有效积温>日均日照>累积降水。 $w\times c[1]/w\times c[1]$ 平面图可以看出,始期与日均气温强负相关,与有效积温、日均日照负相关,而与累积降水正相关。表明以同期气温、日照及降水为主导的气候要素对始期变化具有较大贡献,特别是始期气温的升高对物候始期的提前具有主导控制作用。

标准化偏最小二乘回归模型: $Y = 15.375 - 0.788x_1 + 0.312x_2 + 0.286x_3 - 0.146x_4$
式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 依次表示物候始期的日均气温、有效积温、累积降水、日均日照时数。模型拟合结果, $R^2X(\text{cum}) = 0.721$, $R^2Y(\text{cum}) = 0.728$, $Q^2(\text{cum}) = 0.607$,说明模型预测准确度较高,自变量对物候始期的变化具有很好的解释能力。

4.3.2 气候因子对物候末期的综合影响 表8为秦岭地区物候末期各影响因子的相关系数

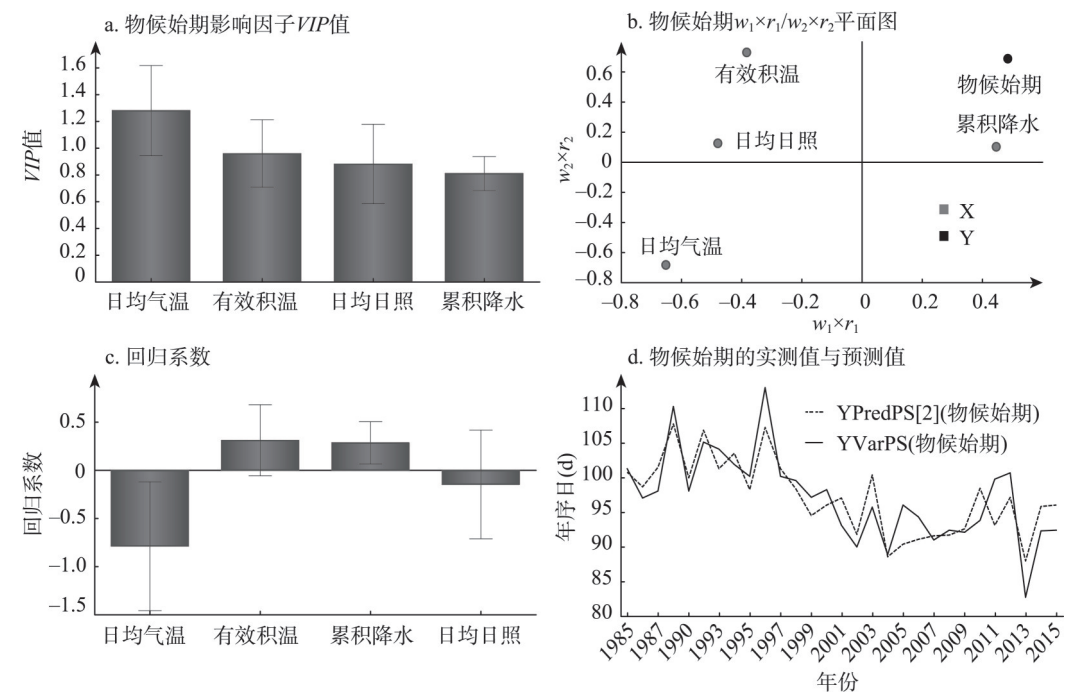


图9 秦岭地区气候因子对物候始期综合影响的PLS分析结果
Fig. 9 Comprehensive impact of the climate factors on the start of phenophases according to PLS analysis in Qinling Mountains region

| 表8 秦岭地区物候末期影响因子的相关系数矩阵 | | | | | | |
|--|--------|---------|-------|--------|---------|---------|
| Tab. 8 Correlation coefficient matrix of influencing factors at the end of plant phenophases in Qinling Mountains region | | | | | | |
| | region | | | | | |
| | 日均气温 | 有效积温 | 累积降水 | 日均日照 | 累积日照 | 物候末期 |
| 日均气温 | 1.000 | 0.733** | 0.151 | 0.448* | 0.632** | 0.756** |
| 有效积温 | | 1.000 | 0.162 | 0.467* | 0.701** | 0.694** |
| 累积降水 | | | 1.000 | -0.013 | -0.055 | 0.423* |
| 日均日照 | | | | 1.000 | 0.719** | 0.466* |
| 累积日照 | | | | | 1.000 | 0.739** |
| 物候末期 | | | | | | 1.000 |

注: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

矩阵。其中, 自变量为同期日均气温、自 8 月始 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温、自 10 月下旬始累积降水、同期日均日照时数及自 10 月始累积日照时数等 5 个影响因子, 因变量为物候末期。

图 10 为物候末期 PLS 结果, 各因子的 VIP 值大小排序依次为: 物候末期的日均气温 (1.145) > 累积日照 (1.118) > 有效积温 (1.060) > 累积降水 (0.829) > 日均日照 (0.793), 即影响因子对物候末期的解释能力依次是: 末期的日均气温>累积日照>有效积温>累积降水>日均日照。末期与日均气温、累积日照、累积降水高度正相关, 说明气温、日照及降水三大气候要素均对物候末期变化具有较大的贡献力, 尤以末期气温的升高对物候末期推迟的主导控制作用最为显著。

标准化偏最小二乘回归模型: $Y = 38.541 + 0.328x_1 + 0.217x_2 + 0.389x_3 + 0.036x_4 + 0.298x_5$
式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 依次表示物候末期的日均气温、有效积温、累积降水、日均日照时数、累积日照时数。由图 10 预测图可见, 观测值与拟合值曲线较为吻合, 模型拟合结果, $R^2X(\text{cum}) = 0.779$, $R^2Y(\text{cum}) = 0.80$, $Q^2(\text{cum}) = 0.704$, 说明模型达到了较高的精度, 自变量对物候末期变化具有较好的解释能力。

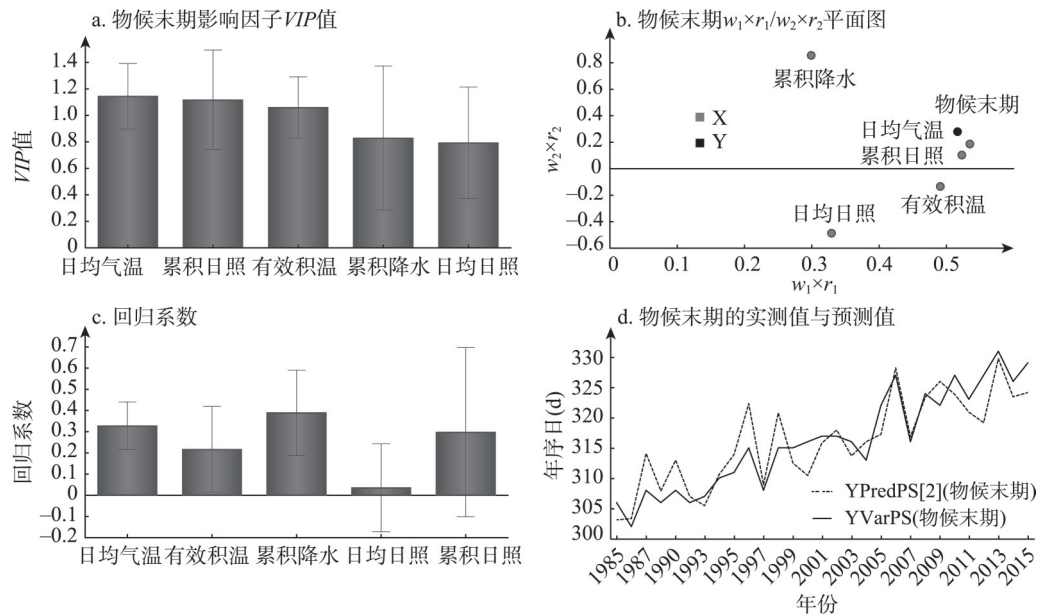


图 10 秦岭地区气候因子对物候末期综合影响的 PLS 分析结果
Fig. 10 Comprehensive impact of the climate factors on the end of phenophases according to PLS analysis in Qinling Mountains region

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 1964-2015 年, 秦岭地区物候始末期的气候均呈干暖化趋势, 且始期的暖化趋势较末期显著, 物候突变后这一趋势尤为明显。物候始末期的气温均呈极显著上升趋势, 且始期的变化速率高于末期; 降水均呈波动减少趋势, 且始期的变化达到了显著水平; 始期的日照时数变化不明显, 而末期呈显著的减少趋势。突变前, 始末期气候因子的变化相对较小。而突变后, 无论是始期还是末期, 气温上升趋势更加显著, 且始期的变化较末期显著; 降水均呈减少趋势, 且末期的变化较始期明显; 日照时数均由突变前的减少趋势转变为显著的增加趋势, 且始期的变化速率高于末期。

(2) 物候始末期对气候因子的响应程度存在差异, 突变后物候期对气候变化的影响表现得更为敏感。秦岭地区植物物候始期与末期的敏感温度均为 10 ℃, 同期日均温的升高对物候始期的提前及末期的推迟效应影响最为显著; 降水对物候始末期的影响表现为累加效应, 始末期随前期累积降水的减少而提前; 日照对始期的提前以同期均值的影响显著, 而末期表现出明显的累加效应。突变前, 气候因子的微弱变化对物候的影响不明显, 而突变后, 始期与末期的日均温每升高 1℃, 始期提前 3.0 d, 末期推迟 12.0 d; 始期的累积降水每减少 1 mm 始期提前 1.3 d, 末期的每增加 1 mm 推迟 1.0 d; 始期与末期的日均日照时数每增加 1 h, 始期提前 4.3 d, 末期推迟 18.3 d。

(3) 气候因子对物候始末期的影响存在滞后效应。物候始期, 气温影响的滞后时效约 1~2 个月, 前期累积降水对物候始期的提前有显著影响, 其滞后时效约 1~3 个月, 而日照的累积滞后效应不明显; 物候末期, 前期累积气温对末期的推迟影响存在累加效应, 其滞后时效约 1~3 个月, 降水的滞后效应不明显, 日照影响的滞后时效约 1~2 个月。

(4) 秦岭地区物候始期与末期均受同期气温、日照、降水的综合影响。气候因子对物候始末期变化的贡献存在差异, 对物候始期变化的解释能力依次为日均气温>有效积温>日均日照>累积降水; 而对物候末期变化的解释能力则是日均气温>累积日照>有效积温>累积降水>日均日照。气温是影响物候始末期变化最重要的因素, 特别是同期日均温的升高对物候始期的提前及末期的推迟具有主导控制作用。

5.2 讨论

随着全球气候变化, 秦岭地区植物物候也发生了相应的变化, 且二者表现出协同变化的特征, 物候呈始期提前, 末期推迟, 生长期延长的变化趋势。物候变化是多种气候要素综合作用的结果, 且物候期对各气候因子响应的敏感性存在差异。众多学者们的研究均表明温度是影响物候变化最重要的气候因素, 升温对植物春季休眠的解除具有促进作用, 而对秋季休眠具有延缓效应, 能够延长植物发育进程^[46]。亦有学者认为, 缩短光周期对诱导温带植物休眠起关键作用^[47], 低温和短日照是落叶树种叶片萎蔫的主要影响因素^[48]; 干旱能够延缓植物的生长发育, 使发育的物候期推迟, 干旱发生时, 光热条件再好, 植物也不能利用^[34], 严重干旱可能导致叶片萎蔫和凋落^[49]。本研究表明, 秦岭地区物候始末与末期主要受气温升高、光周期延长和干旱胁迫的综合影响。可见, 本文研究结果与学者们的结论一致。但是, 植物物候变化除受环境因素的影响外, 还受到遗传效应、生活型、生活对策等生物因素的影响, 物候对气候变化的响应机制仍是亟待深入探究的问题。

IPCC5 预估结果表明, 人类活动导致未来全球气候变暖的趋势可能延续, 植物物候期也将因此发生变化, 从而对生态系统、农业生产、人类健康等方面产生影响, 我们的研究也证实了气候变化导致了植物生长期的延长。生长期的延长, 就农业而言, 有利于农作物品种结构的调整与优化, 从而提高粮食作物的产量; 有利于经济作物在一年中进行二次结果甚至多次结果, 提高经济效益。林业方面, 有利于乔木加快生长, 缩短成材年限; 有利于灌木在一年中提早开花, 或者有多次花期, 增加观赏价值。当然, 气候变化对植物物候的影响有积极作用, 同时也存在消极作用。因此, 预测未来气候变化对植物物候的影响研究具有重要的意义, 可对不利影响进行准确评估, 为趋利避害采取正确对策提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United

- Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Barr A, Black T A, McCaughey H. Climatic and phenological controls of the carbon and energy balances of three contrasting boreal forest ecosystems in western Canada//Phenology of Ecosystem Processes. New York: Springer, 2009, 3-34.
- [3] Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421 (6918): 57-60.
- [4] Zhang H C, Yuan W P, Liu S G, et al. Sensitivity of flowering phenology to changing temperature in China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1658-1665.
- [5] Wu C, Gonsamo A, Gough C M, et al. Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147(18): 79-88.
- [6] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169(3): 156-173.
- [7] Orlandi F, Ruga L, Romano B, et al. Olive flowering as an indicator of local climatic changes. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, 81(3/4): 169-176.
- [8] Donnelly A, Jones M B, Sweeney J. A review of indicators of climate change for use in Ireland. *International Journal of Biometeorology*, 2004, 49(1): 1-12.
- [9] Li Hongmei, Ma Yushou, Wang Yanlong. Influences of climate warming on plant phenology in Qinghai Plateau. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(4): 500-505. [李红梅, 马玉寿, 王彦龙. 气候变暖对青海高原地区植物物候期的影响. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 500-505.]
- [10] Yu Zhenyan, Gao Dawei, Wu Lihong, et al. Influence of weather conditions on paulownia phenological period in Zhejiang province. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, 34(6): 666-671. [郁珍艳, 高大伟, 吴利红, 等. 气候条件对浙江省泡桐物候期的影响研究. *气象科学*, 2014, 34(6): 666-671.]
- [11] Chen Xiaoqi, Pang Cheng, Xu Lin, et al. Spatiotemporal response of *Salix matsudana*'s phenophases to climate change in China's temperate zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3625-3635. [陈效述, 庞程, 徐琳, 等. 中国温带旱柳物候期对气候变化的时空响应. *生态学报*, 2015, 35(11): 3625-3635.]
- [12] Li Tongxiao. Effect of climate change on soybean growth period in Henan Province. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2015, 38(2): 24-28. [李彤霄. 河南省气候变化对大豆生育期的影响研究. *气象与环境科学*, 2015, 38(2): 24-28.]
- [13] Wu Zhenqiang, Du Yaodong. Spring phenological characteristics of woody plants and its response to climate changes in the central area of Guangdong Province. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2014, 37(1): 1-4. [吴振强, 杜尧东. 粤中地区木本植物春季物候特征及其对气候变化的响应. *气象与环境科学*, 2014, 37(1): 1-4.]
- [14] Chmielewski F M, Rölzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.
- [15] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 2003, 57(3): 243-263.
- [16] Zhang Fuchun. Effect of global warming on plant phenological events in China. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 402-410. [张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. *地理学报*, 1995, 50(5): 402-410.]
- [17] Chen X Q, Lin X. Temperature controls on the spatial pattern of tree phenology in China's temperate zone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154/155(3): 195-202.
- [18] Zhang Xuexia, Ge Quansheng, Zhang Jingyun. Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phenological information. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 123-130. [张学霞, 葛全胜, 郑景云. 近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效: 基于遥感数据和物候资料的分析. *生态学杂志*, 2005, 24(2): 123-130.]
- [19] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [20] Penuelas J, Filella I, Zhang X Y, et al. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytologist*, 2004, 161(3): 837-846.
- [21] Rathcke B, Lacey E P. Phenological patterns of terrestrial plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1985, 16: 179-214.
- [22] Ghazanfar S A. The phenology of desert plants: A 3-year study in a gravel desert wadi in northern Oman. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35(3): 407-417.
- [23] Shinoda M, Ito S, Nachinshonhor G U, et al. Phenology of Mongolian grasslands and moisture conditions. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85(3): 359-367.
- [24] Omotosho J. Long-range prediction of the onset and end of the rainy season in the west African Sahel. *International*

- Journal of Climatology, 1992, 12(4): 369-382.
- [25] Tyson P D. Climatic change in southern Africa: Past and present conditions and possible future scenarios. *Climatic Change*, 1991, 18(2/3): 241-258.
- [26] Fauchereau N, Trzaska S, Rouault M, et al. Rainfall variability and changes in southern Africa during the 20th century in the global warming context. *Natural Hazards*, 2003, 29(2): 139-154.
- [27] Lampe M G, Bergeron Y, McNeil R, et al. Seasonal flowering and fruiting patterns in tropical semi-arid vegetation of northeastern Venezuela. *Biotropica*, 1992, 24(1): 64-76.
- [28] Reich P B. Phenology of tropical forest: Patterns, causes, and consequences. *Canadian Journal of Botany*, 1995, 73(2): 164-174.
- [29] Justiniano M J, Fredericksen T S. Phenology of tree species in Bolivian dry season. *Biotropica*, 2000, 32(2): 276-281.
- [30] Kramer K, Leinonen I, Loustau D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forest ecosystems: An overview. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 67-75.
- [31] Wielgolaski F E. Phenological modifications in plants by various edaphic factors. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 196-202.
- [32] Keller F, Körner C. The role of photoperiodism in alpine plant development. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2003, 35(3): 361-368.
- [33] Schaber J, Badeck F W. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *International Journal of Biometeorology*, 2003, 47(4): 193-201.
- [34] Wang Lianxi, Chen Huailiang, Li Qi, et al. Research advances in plant phenology and climate. *Acta ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 447-454. [王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展. *生态学报*, 2010, 30(2): 447-454.]
- [35] Körner C, Basler D. Phenology under global warming. *Science*, 2010, 327(5972): 1461-1462.
- [36] Bai Hongying. The Response of Vegetation to Environmental Change in Qinba Mountains. Beijing: Science Press, 2014. [白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [37] Deng Chenhui, Bai Hongying, Zhai Danping, et al. Variation in plant phenology in the Qinling Mountains from 1964-2015 in the context of climate change. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7882-7893. [邓晨晖, 白红英, 翟丹平, 等. 气候变化背景下 1964-2015 年秦岭植物物候变化. *生态学报*, 2017, 37(23): 7882-7893.]
- [38] Hou Meiting, Hu Wei, Qiao Hailong, et al. Application of Partial Least Squares (PLS) regression method in attribution of vegetation change in eastern China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(3): 409-422. [侯美亭, 胡伟, 乔海龙, 等. 偏最小二乘(PLS)回归方法在中国东部植被变化归因研究中的应用. *自然资源学报*, 2015, 30(3): 409-422.]
- [39] Wang Huiwen. Partial Least Squares Regression Method and Application. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. [王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1999.]
- [40] Pérez-Enciso M, Tenenhaus M. Prediction of clinical outcome with microarray data: A partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) approach. *Human Genetics*, 2003, 112(5/6): 581-592.
- [41] Johnson R A, Wichern D W. Applied Multivariate Statistical Analysis. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [42] Liu Jing, Zheng Youfei, Zhao Guoqiang, et al. Responses of phenology to climate change in Zhengzhou area. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1471-1479. [柳晶, 郑有飞, 赵国强, 等. 郑州植物物候对气候变化的响应. *生态学报*, 2007, 27(4): 1471-1479.]
- [43] Augspurger C K, Cheeseman J M. Light gains and physiological capacity of understorey woody plants during phenological avoidance of canopy shade. *Functional Ecology*, 2005, 19(4): 537-546.
- [44] Augspurger C K, Bartlett E A. Differences in leaf phenology between juvenile and adult trees in a temperate deciduous forest. *Tree Physiology*, 2003, 23(8): 517-525.
- [45] Bai Jie, Ge Quansheng, Dai Junhu. Response of woody plant phenophases to climate change for recent 30 years in Guiyang. *Geographical Research*, 2009, 28(6): 1606-1614. [白洁, 葛全胜, 戴君虎. 贵阳木本植物物候对气候变化的响应. *地理研究*, 2009, 28(6): 1606-1614.]
- [46] Li Rongping, Zhou Guangsheng, Zhang Huiling. Research advances in plant phenology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 541-544. [李荣平, 周广胜, 张慧玲. 植物物候研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 541-544.]
- [47] Hänninen H. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. *Acta Forestalia Fennica*, 1990, 213: 1-47.
- [48] Yang Yang, Luo Xian, Li Rongping, et al. A review of the effect of meteorological factors on plant phenology and its driving mechanisms. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(5): 154-159. [杨扬, 罗贤, 李荣平, 等. 气象要素对植物物候影响及其驱动机制研究进展. *气象与环境学报*, 2016, 32(5): 154-159.]

- [49] Bréda N, Huc R, Granier A, et al. Temperature forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 2006, 63(6): 625-644.

Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling Mountains region during 1964-2015

DENG Chenhui^{1,2}, BAI Hongying^{1,2}, GAO Shan³, HUANG Xiaoyue^{1,2}, MENG Qing^{1,2},
ZHAO Ting^{1,2}, ZHANG Yang^{1,2}, SU Kai^{1,2}, GUO Shaozhuang^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key

Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China;

3. Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710016, China)

Abstract: Based on the data of phenological observation and daily meteorological records during 1964-2015, we studied the relationship between plant phenology variation and climate change in the Qinling Mountains region by using correlation and Partial Least Squares (PLS) regression analysis. The results showed that: (1) In the past 52 years, the climate of the study region presented a warming-drying trend at the start and the end of plant phenophase, and the warming trend at the start of phenophase is more significant than that at the end of phenophase, especially after the phenophase abrupt change around 1985. (2) The responses of the start and the end of phenophase to the change of climatic factors such as temperature, precipitation and sunshine varied differently. Before the period of phenophase abrupt change, the responses of phenophases were not significant to all the climatic factors except for the daily mean temperature. However, after the period of phenophase abrupt change, the response of phenophases was significant to all the climatic factors. The start of phenophase advanced by 3 d and the end of phenophase delayed by 12 d with the increase of the daily mean temperature by 1°C. The start of phenophase advanced by 1.3 d with the decrease of the accumulated precipitation by 1 mm, and the end of phenophase delayed by 1 d with the increase of the accumulated precipitation by 1 mm. The start of phenophase advanced by 4.3 d and the end of phenophase delayed by 18.3 d with the increase of daily mean sunshine hours by 1 h, respectively. (3) There is a lag effect for the responses of the start and the end of phenophase to climate change. The time-lag was about 1-2 months for air temperature and about 1-3 months for the pre-period accumulated precipitation at the start of phenophase, respectively. No lag effect on the start of phenophase was observed for the sunshine hours. As related to the end of phenophase, the time-lag was about 1-3 months for the air temperature and about 1-2 months for the sunshine hours, respectively. No lag effect on the end of phenophase was found for the precipitation. (4) Both the start and the end of phenophase were jointly affected by the climatic factors, in which the air temperature was the predominant factor. Especially, the rise of the daily mean temperature plays a dominant role in advancing the start of phenophase and delaying the end of phenology.

Keywords: climate change; phenological variation; comprehensive impact; lag effect; Qinling Mountains region