

# 1960-2015年中国绿洲胡杨生长季对全球变暖的时空响应及原因

张文霞, 刘普幸, 冯青荣, 汪天广, 王天强

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:** 基于中国绿洲胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)分布区48个地面气象站1960-2015年逐日平均气温数据,采用线性趋势法、Mann-Kendall检验、ArcGIS反距离加权插值法(IDW)、Morlet小波功率谱和相关分析等方法,分析了中国绿洲胡杨年生长季的起止日及生长期长短对气候变暖的时空响应特征及原因。结果表明:近56年来,中国绿洲胡杨年生长季具有起始日提前、终止日推迟、生长期延长的变化趋势,变化倾向率分别为 $-1.34\text{ d}/10\text{a}$ 、 $1.33\text{ d}/10\text{a}$ 、 $2.66\text{ d}/10\text{a}$  ( $\alpha \geq 0.001$ );空间差异十分显著,呈现出由西南向东北起始日越迟,终止日越早,生长期越短的变化规律。胡杨生长季起止日及生长期分别在2001年、1989年和1996年发生突变,且分别存在3.56~7.14 a不等的短周期,与厄尔尼诺2~7 a的周期一致,起始日3.56 a和4.28 a的周期与大气环流2~4 a的周期吻合。原因分析表明亚洲极涡面积指数、青藏高原指数、西风指数和年均二氧化碳排放量是影响胡杨生长季变化的主要因素;此外,纬度对胡杨生长季的影响要明显大于海拔高度,且起始日受纬度和海拔高度的影响比终止日更加显著;胡杨生长季起止日和生长期分别与对应月份的平均气温呈显著的高相关性,且3月均温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,起始日提前2.21 d,10月均温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,终止日推迟2.76 d,3-10月均温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,生长期延长7.78 d,表明胡杨生长季的变化对全球变暖的区域响应十分敏感。

**关键词:** 胡杨;年生长季;全球变暖;时空响应;中国绿洲

DOI: 10.11821/dlxb201707002

## 1 引言

近百年来全球变暖已毋庸置疑,IPCC第五次评估报告指出,1880-2012年,全球地表平均温度升高了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且中国气候变暖的趋势与全球一致<sup>[1]</sup>。而植被是陆地生态系统中最重要组分,其物候变化对区域气候的响应敏感且易于观察<sup>[2]</sup>,因此,植物物候变化对全球气候响应的研究已成为国内外气候变化研究领域的热点<sup>[3]</sup>,诸多研究已证实全球变暖使植物生长季起止日和生长期都发生相应的变化<sup>[4]</sup>。国外对物候的研究开始的较早,欧洲有组织的物候观察最早始于18世纪中期,后逐渐建立EPN(欧洲物候观测网)、IPG(欧洲国际物候园)等物候观测网络,以方便研究<sup>[4]</sup>。Menzel等利用IPG 1960-1990年的物候资料研究发现,欧洲植物因气温上升,春季物候提前6 d,秋季物候推迟4.8 d<sup>[5]</sup>;北美

收稿日期: 2016-11-28; 修订日期: 2017-03-21

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40961035); 甘肃省科技计划基金项目(0803RJZA094) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40961035; The Science Technology and Project of Gansu Province, No.0803RJZA094]

**作者简介:** 张文霞(1987-), 女, 甘肃武山人, 硕士, 研究方向为干旱区域环境与绿洲建设。E-mail: zwxjiayou@sina.com

**通讯作者:** 刘普幸(1964-), 女, 山西平遥人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为干旱区域环境与绿洲建设、树轮水文学等。E-mail: liupx2016@163.com

紫丁香<sup>[6]</sup>、比利时温带木本植物<sup>[7]</sup>春季物候期也都明显提前；春季增温 1℃ 导致欧洲甜樱桃、毛桦等植物生长季起始日提前了 8 d<sup>[2]</sup>；生长季终止日的推迟趋势在北半球 70% 的地区都很明显，平均速率为 0.18±0.38 d/a<sup>[8]</sup>。物候变化对气候的响应还表现在植物始花期、展叶期、着色期等物候期的变化。欧洲中部地区的植物<sup>[9]</sup>（雪花莲、连翘、甜樱桃和苹果）、英国 11 种植物<sup>[10]</sup>、加拿大山杨<sup>[11]</sup>、伊朗 Kerman 和 Shiraz 的柑橘<sup>[12]</sup>、匈牙利植物<sup>[13]</sup>（铃兰、接骨木、小叶椴、蒲公英）的始花期均有提前；瑞士马栗树<sup>[14]</sup>及立陶宛落叶树种<sup>[15]</sup>的展叶期，格鲁吉亚白葡萄<sup>[16]</sup>的着色期也都明显提前。竺可桢先生是中国现代物候学创始人，于 1963 年建立中国物候观测网，为研究物候变化提供数据<sup>[17]</sup>。张福春在 1995 年指出气温是影响中国木本植物物候变化的主要气象因子，当年均温上升 1℃ 时，中国木本植物春季物候期约提前 3~4 d，秋季物候期约推迟 3~4 d<sup>[18]</sup>。此外，一些学者还对中国温带植物<sup>[19]</sup>、河北草本植物<sup>[20]</sup>、贵阳木本植物<sup>[21]</sup>、郑州植物<sup>[22]</sup>、民勤荒漠区植物<sup>[23]</sup>的物候变化进行研究，均表现出春季物候提前，秋季物候推迟的变化趋势；陈效逖还指出植被的多年平均生长季长度主要随纬度和海拔高度变化<sup>[24]</sup>。

胡杨是地处亚洲中部荒漠区分布最广的乔木树种之一，横跨亚、非、欧三个大陆的 20 个国家，其中中国绿洲胡杨林分布面积及数量均为世界第一，主要分布在新疆、青海柴达木盆地、阿拉善高原、河西走廊、河套平原等绿洲中<sup>[25-27]</sup>。胡杨具有耐干旱、耐盐碱、防风、生长快、适应性强<sup>[25]</sup>等优点，是维护干旱区绿洲生态平衡的绿色卫士，其生长季起止日和生长期的变化，是研究中国绿洲气候变化的指示器。目前中国胡杨生长季变化对气候响应的研究仅集中在河西走廊绿洲<sup>[27]</sup>、额济纳旗绿洲<sup>[28]</sup>等个别区域，而对广大的新疆绿洲、河套绿洲、柴达木盆地绿洲的胡杨尚未研究，对气候响应的时空格局与成因也不清楚。因此，本文对中国绿洲胡杨生长季起止日及生长期的时空变化特征进行探讨，以期更好地反映中国绿洲胡杨对气候变化的响应，为中国绿洲生态环境的恢复与重建提供理论依据，也有助于提高该区域应对气候变化的能力。

## 2 研究区概况

中国绿洲地处 34°25'N~48°10'N、73°40'E~109°08'E，主要分布在中国西北的荒漠与半荒漠区，几乎都依托高大山系及巨大的山前洪积扇而存在（图 1），多为平原荒漠气候，干旱少雨，冬寒夏炎，气温年较差和日较差都很大，热量丰富，大体自东向西递增，≥ 10℃ 积温从河西走廊的 2500℃ 增至新疆塔里木盆地的 4500℃ 以上，但柴达木盆地因受青藏高原垂直带的影响，积温偏低，大多不足 1500℃。年平均降水量在 200 mm 以下，蒸发量大；光照丰富，尤其是河西走廊、塔里木盆地及内蒙古西部地区，年太阳总辐射量均在 586 kJ/cm<sup>2</sup> 以上<sup>[29]</sup>。土壤以棕漠土、灰棕漠土和风沙土为主，地带性植被以荒漠和荒漠草原为主。

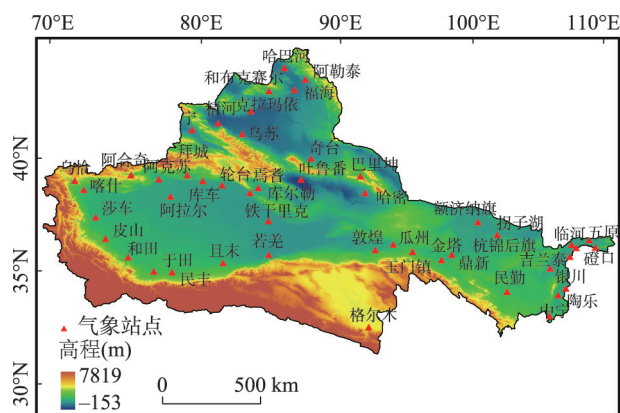


图 1 中国绿洲胡杨林气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations of *P. euphratica* in Chinese oases

### 3 资料与方法

本文根据胡杨的分布范围, 选用中国绿洲胡杨分布区所在的48个地面气象站1960-2015年逐日平均气温数据, 数据源于中国气象局科学数据服务共享网 (<http://www.cma.gov.cn/>)。申元村等根据绿洲区划的原则和方法将中国绿洲划分为北疆绿洲、南疆绿洲、河西走廊绿洲、柴达木盆地绿洲、河套平原绿洲和阿拉善绿洲<sup>[29]</sup>; 常兆丰等根据民勤沙生植物园1974-2007年42种植物的物候观测资料, 分析认为气温是影响干旱区绿洲植物物候期的主要因子, 气温升高是导致民勤荒漠区植物物候期变化的主要原因<sup>[23]</sup>。根据魏庆莒提出的胡杨年生长季始于春季日均温稳定 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 止于秋季日均温稳定 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的标准<sup>[25]</sup>, 确定胡杨年生长季的起始日、终止日和生长期, 中国绿洲胡杨生长季起止日和生长期则是按照绿洲亚区加权平均计算获得的。环流特征指数采用国家气候中心提供的74项环流指数(1960-2015年月数据)中的冷空气指数(CA)、青藏高原指数(TPI)、亚洲极涡指数(APVII、APVAI)和西风指数(WCI); 年均二氧化碳排放量(CDE)(1960-2011年)来自世界银行的发展指标数据库(WDI) (<http://data.worldbank.org>)。本文采用线性趋势法分析胡杨生长季的年际变化特征和趋势, 利用ArcGIS 9.3软件中IDW(反距离加权法)插值法分析中国绿洲胡杨生长季的空间变化特征及趋势, 并进行空间差异分析, 利用Mann-Kendall法进行突变检验和趋势分析, Morlet小波功率谱进行周期分析, 采用相关分析法与二元回归分析法探讨各影响因素对胡杨生长季变化的影响。

### 4 结果与分析

#### 4.1 中国绿洲胡杨林主要生长季的时间变化特征

**4.1.1 生长季起始日** 近56年来, 中国绿洲胡杨生长季起始日呈显著提前趋势(图2a), 变化倾向率为 $-1.34\text{d}/10\text{a}$  ( $\alpha \geq 0.001$ ), 平均年生长季起始日为3月21日, 56年来起始日平均提前了7.5d。各绿洲胡杨生长季起始日不一, 且均呈提前趋势, 但提前程度各异(图3a1~3f1)。其中南疆绿洲胡杨生长季起始最早, 平均为3月11日, 柴达木盆地绿洲最晚, 平均为4月8日。起始日提前趋势最明显的是河套绿洲, 变化倾向率为 $-2.55\text{d}/10\text{a}$  ( $\alpha \geq 0.001$ ), 56年来绿洲胡杨生长季起始日共提前了14d; 提前趋势最不明显的是南疆绿洲, 变化倾向率仅为 $-0.95\text{d}/10\text{a}$  ( $\alpha \geq 0.05$ ), 56年来其胡杨生长季起始日仅提前了5.4d。

从年代际变化来看(表1), 中国绿洲胡杨生长季起始日在20世纪60-80年代为正距平, 且70年代有起始日略微推迟的趋势, 从20世纪80年代开始起始日呈提前趋势, 到90年代起始日距平值由正值转为负值, 且在20世纪90年代-21世纪前10年距平值变化最大, 到21世纪前10年距平值最大, 为3.8d, 表明21世纪初胡杨生长季起始日提前最显著。

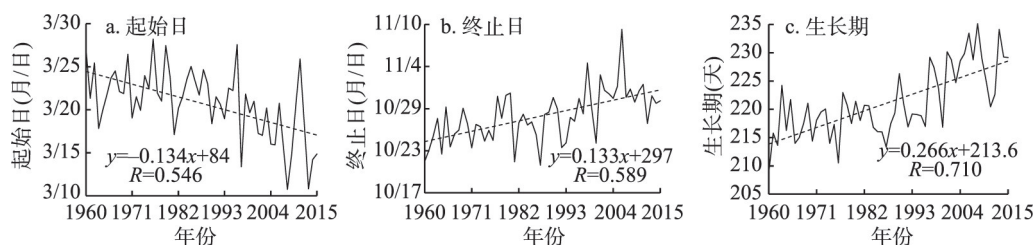


图2 中国绿洲胡杨林生长季起始日、终止日和生长期年际变化趋势

Fig. 2 Variation trend of the onset and upset date and growing period of *P. euphratica* in Chinese oases

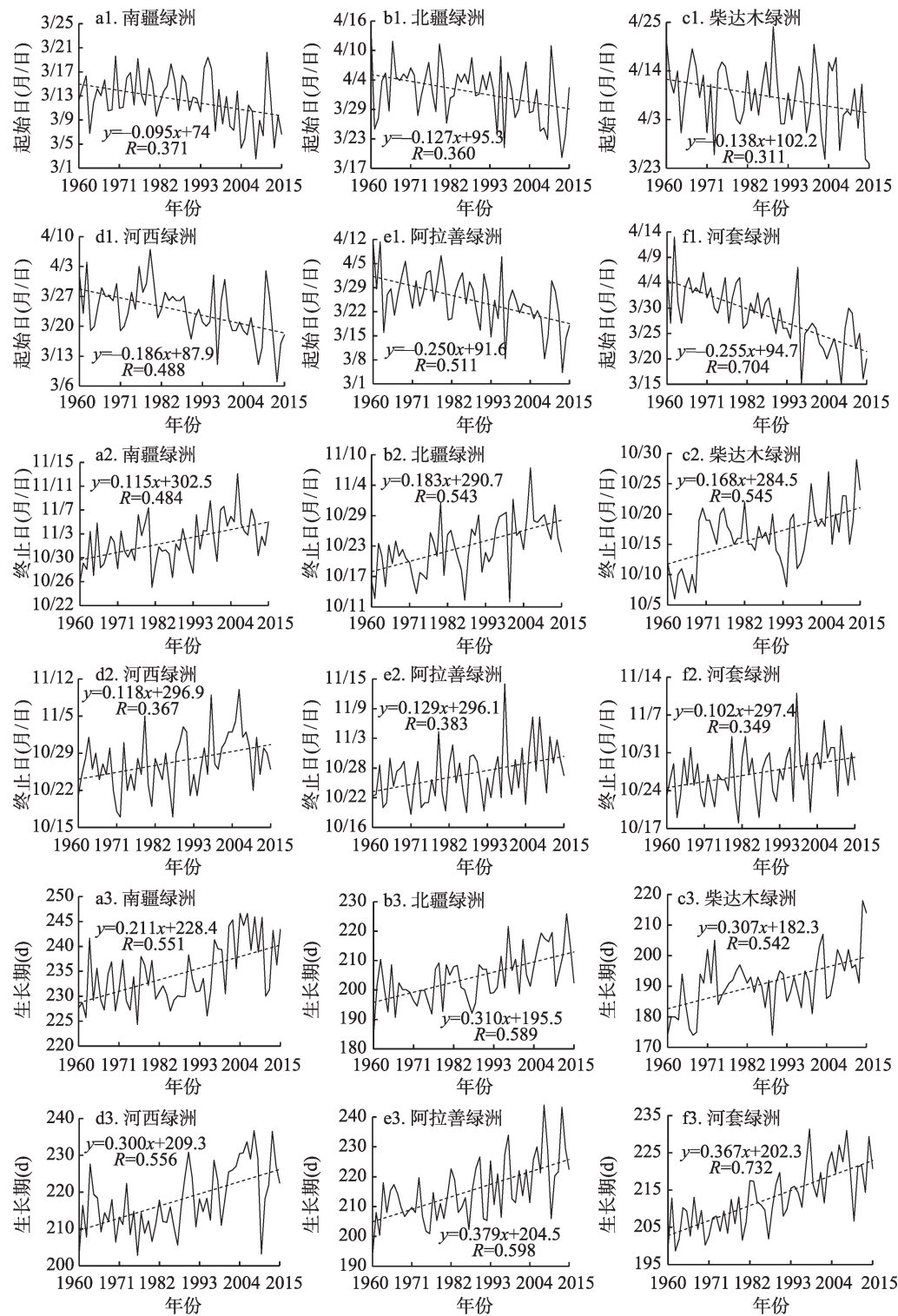


图3 中国各绿洲胡杨林生长季起止日及生长期的年际变化趋势

Fig. 3 Variation trend of the onset and upset date and growing period of *P. euphratica* in each oasis of China



**4.1.2 生长季终止日** 近56年来, 中国绿洲胡杨生长季终止日呈显著推迟趋势(图2b), 变化倾向率为1.33 d/10a ( $\alpha \geq 0.001$ ), 平均年生长季终止日为10月28日, 56年来终止日平均推迟了7.5 d。各绿洲胡杨生长季终止日虽有早有晚, 但均呈推迟趋势(图3a2~3f2)。其中, 柴达木盆地绿洲胡杨生长季结束最早, 平均为10月16日, 南疆绿洲最晚, 平均为11月1日。56年来北疆绿洲胡杨生长季终止日推迟趋势最明显, 变化倾向率为1.83 d/10a ( $\alpha \geq 0.001$ ), 56年共推迟了10 d; 河套绿洲推迟趋势最不明显, 其变化倾向率仅为1.02 d/10a ( $\alpha \geq 0.05$ ), 56年仅推迟了5.7 d。

从年代际变化来看(表1), 中国绿洲胡杨生长季终止日在20世纪60-80年代均为负距平, 数值介于-2.7~-1.5之间, 且80年代有终止日略微提前的趋势; 从90年代开始生长季终止日呈推迟趋势, 且距平值由负值转为正值, 即在0.5~3.6之间, 且在20世纪90年代-21世纪前10年变化最大, 到21世纪前10年距平值高达3.6, 表明21世纪前10年胡杨生长季终止日推迟趋势最明显。

**4.1.3 生长期** 近56年来, 中国绿洲胡杨年生长期呈显著延长趋势(图2c), 变化倾向率为2.66 d/10a ( $\alpha \geq 0.001$ ), 56年来生长期共延长了15 d。胡杨平均年生长期为221 d, 其中生长期最长为2008年的235 d, 最短为1960年的209 d; 各绿洲胡杨生长期长度不同且均呈延长趋势(图3a3~3f3), 其中南疆绿洲胡杨平均生长期为234 d, 为全区最长, 柴达木盆地绿洲胡杨平均生长期最短, 仅为191 d, 北疆绿洲胡杨生长期为204 d, 也较短。阿拉善绿洲生长期的延长趋势最为明显, 变化倾向率为3.79 d/10a ( $\alpha \geq 0.001$ ), 56年来共延长了21 d; 南疆绿洲胡杨生长期延长趋势最不明显, 变化倾向率仅为2.11 d/10a ( $\alpha \geq 0.001$ ), 56年来生长期仅延长11.8 d。

从年代际变化来看(表1), 研究区胡杨生长期呈显著延长趋势, 距平值在20世纪60-80年代均为负值, 且距平值绝对值逐渐减小, 生长期逐渐延长, 从20世纪90年代开始距平值由负距平转为正距平, 并且逐渐增大, 20世纪90年代-21世纪前10年变化最大, 距平值增加了6.6d, 到21世纪前10年距平值高达7.3 d, 生长期延长趋势最明显。

表1 中国绿洲胡杨生长季年代际距平

Tab. 1 The decadal anomalies of the growing season of *P. euphratica* in Chinese oases

年代	起始日	终止日	生长期
20世纪60年代	1.8	-2.7	-4.4
20世纪70年代	2.4	-1.3	-3.7
20世纪80年代	1.6	-1.5	-3.2
20世纪90年代	-0.1	0.5	0.7
21世纪前10年	-3.8	3.6	7.3
2010-2015年	-3.3	2.3	5.5

综上所述, 近56年来, 中国绿洲胡杨生长季存在明显的起始日提前、终止日推迟, 生长期延长的变化趋势, 这与中国木本植物春季物候期提前, 秋季物候期推迟, 生长期延长的研究结论相一致<sup>[18]</sup>。从总体来看, 研究区胡杨生长季起始日提前趋势较终止日推迟趋势更为显著, 这与欧洲植物生长期的延长主要因春季物候提前的结论一致<sup>[2]</sup>。

## 4.2 中国绿洲胡杨林主要生长季的空间变化特征

本文利用ArcGIS 9.3中IDW插值法, 以各绿洲所在48个站点胡杨生长季起止日和生长期的56年平均值作为参数, 绘制中国绿洲胡杨生长季起止日期、生长期的空间变化特征图, 以探讨其空间分布特征和规律。

中国绿洲胡杨生长季起止日及生长期的空间差异十分显著, 但三者的空间变化特征一致, 均表现为自西南向东北起始日逐渐推迟, 终止日逐渐提前, 生长期逐渐缩短的变化规律, 且这种变化规律在新疆绿洲尤为明显(图4)。中国绿洲胡杨生长季起始日介于2月9日至4月18日, 终止日介于10月8日至11月14日, 生长期介于173~256 d之间, 其中南疆绿洲西南部地区胡杨生长季起始最早, 终止最晚, 生长期最长, 这是因为南疆地

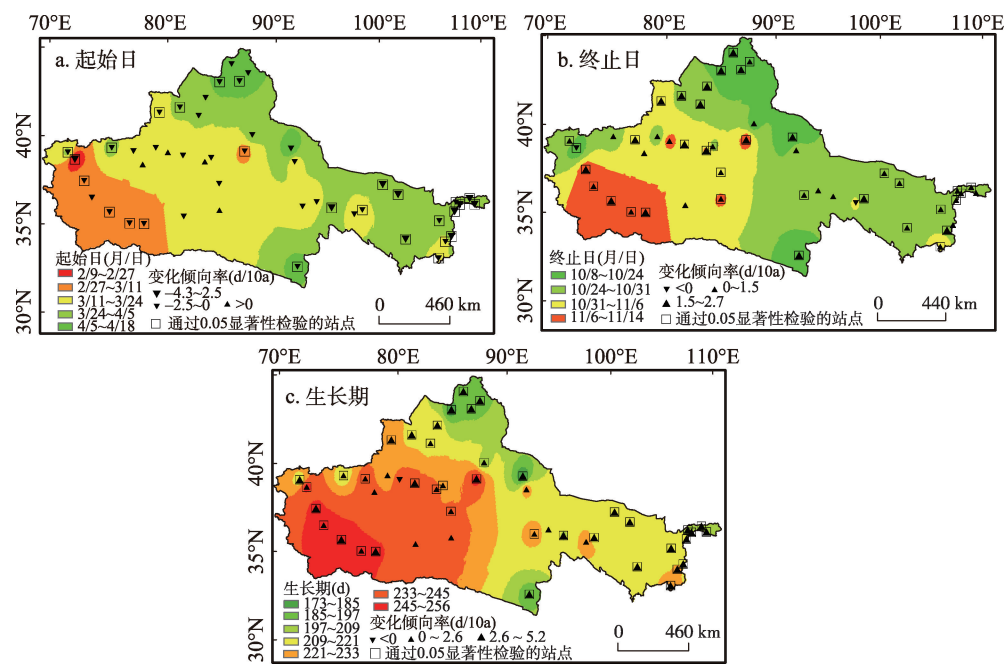


图4 中国绿洲胡杨生长季起止日、生长期的空间变化趋势

Fig. 4 Spatial distribution trend of onset and upset date and growing period of *P. euphratica* in Chinese oases

处天山以南的塔里木盆地，受天山阻挡，地形闭塞，冷空气东入的机会多，且到达绿洲西南部已是强弩之末<sup>[30]</sup>，再加上下垫面沙漠广布，盆地地形热量难以扩散，故南疆绿洲西部整体较暖；柴达木盆地绿洲胡杨生长季起始日最晚，终止日最早，生长期最短，这是因为柴达木盆地是高原绿洲，海拔较高，气温较低。

从变化趋势来看，研究区胡杨生长季起始日92%的站点处于提前趋势，其中56%的站点通过了0.05的显著性检验；终止日96%的站点处于推迟趋势，其中75%的站点通过了0.05的显著性检验；生长期98%的站点处于延长趋势，其中85%的站点通过了0.05的显著性检验，这表明中国绿洲胡杨生长期的延长趋势十分明显且很普遍。其中，河套绿洲和阿拉善绿洲均具有起始日提前、生长期延长，但终止日推迟趋势很不明显的变化特征，这可能因为内蒙古地区冬夏升温最明显，其次是春季，而秋季升温最为微弱造成的<sup>[31]</sup>；南疆地区起始日提前趋势及生长期延长趋势都最不明显，终止日推迟趋势也很不明显，北疆绿洲终止日推迟趋势最明显，但起始日提前趋势不明显，这与近45年（1961-2005年）新疆气温的季节增温率春季最低有关<sup>[32]</sup>；柴达木盆地绿洲终止日推迟趋势十分明显，但起始日提前趋势不明显，这与柴达木盆地秋冬季增温明显高于春夏，且春季增暖最缓慢有关<sup>[33]</sup>。

4.3 突变分析

本文采用 Mann-Kendall 法对 1960-2015 年中国绿洲胡杨的生长季起止日和生长期的变化进行突变检测分析，子序列长度为 3 a，给定显著性水平  $\alpha = 0.01$ ，临界线  $U_\alpha = \pm 2.56$ 。

结果表明，近 56 年来，中国绿洲胡杨生长季起始日在 2001 年发生突变（图 5a），2001 年后起始日明显提前，且从 2005 年开始，UF 曲线超过临界线，胡杨生长季起始日显著提前；2001 年突变前起始日平均在 3 月 22 日，突变后变为 3 月 17 日，突变后较突变前起始日提前 5 d（表 2）。胡杨生长季终止日突变年份为 1989 年（图 5b），且从 2000 年开始，UF 曲线超过临界线，终止日显著推迟；突变前终止日平均在 10 月 26 日，突变后

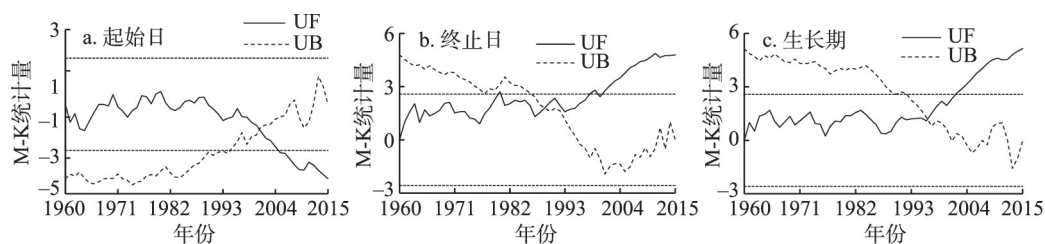


图5 中国绿洲胡杨生长季起止日、生长期的突变分析

Fig. 5 Mutation analysis of onset and upset date and growing period of *P. euphratica* in Chinese oases

平均在10月30日, 突变后较突变前终止日推迟了4 d。胡杨生长期在1996年发生突变(图5c), 由UF曲线可知, 1996年以前, 胡杨生长期缓慢延长, 从1996年开始, 胡杨生长期延长趋势十分显著; 突变前平均生长期为218 d, 突变后平均为228 d, 突变前后生长期延长10 d。显然, 胡杨生长季终止日对气候变暖的响应更加敏感。

#### 4.4 周期分析

本文继而采用Morlet小波功率谱分析方法对中国绿洲胡杨生长季起止日及生长期进行周期分析。结果表明, 研究区胡杨生长季具有明显的短周期特征, 其中, 胡杨生长季起始日存在3.56 a、4.28 a ( $\alpha \geq 0.1$ ) 的周期(图6a), 终止日存在5.31 a、5.85 a、7.14 a ( $\alpha \geq 0.1$ ) 的周期(图6b), 生长期存在7.09 a ( $\alpha \geq 0.15$ ) 的周期(图6c)。胡杨生长季起止日和生长期的周期均与厄尔尼诺2~7 a的活动周期相一致, 起始日的周期与大气环流2~4 a的周期相吻合, 表明胡杨生长季起止日及生长期受大气环流和厄尔尼诺事件的影响较大。

#### 4.5 成因分析

**4.5.1 影响因子的相关分析** 本文从自然因素和人为因素两方面探讨胡杨生长季起止日及生长期变化的影响因素, 选取了APVAI、APVII、CA、TPI和WCI作为自然因素指标, 年均二氧化碳排放量CDE(年数据)作为人为因素指标, 将各指标3月、10月、3-10月的均值与中国各绿洲胡杨生长季起止日及生长期建立相关关系, 研究年际尺度胡杨生长季变化的驱动因子。其中柴达木盆地胡杨生长季起止日及生长期与各指数4月、11月和4-11月的均值建立相关关系。

结果表明: 胡杨生长季起止日及生长期的变化主要受APVAI、TPI、WCI和CDE的

表2 中国绿洲胡杨生长季突变前后的变化

Tab. 2 The change of the growing season of *P. euphratica* in Chinese oases before and after mutation

	起始日	终止日	生长期(d)
突变前	3月22日	10月26日	218
突变后	3月17日	10月30日	228
变化(d)	-5	4	10

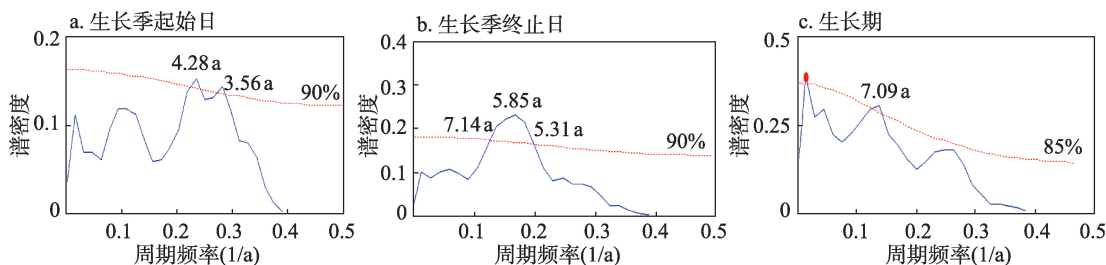


图6 中国绿洲胡杨生长季起止日及生长期的Morlet小波分析

Fig. 6 Morlet wavelet of the onset and upset date and growing period of *P. euphratica* in Chinese oases

影响(表3),这与小波功率谱周期结果一致。当亚洲极涡面积大时,胡杨生长季起始日较迟,终止日较早,生长期较短。TPI与胡杨生长季起止日及生长期存在较为显著的相关性,尤其与河西走廊和南疆绿洲的相关性很高,这主要与青藏高原的动力和热力作用有关,冬季由于高原的分支作用,冷空气一支由东进入南疆,另一支沿河西走廊南下,进而影响胡杨生长季起止日期的变化<sup>[34]</sup>。除柴达木盆地绿洲外,中国绿洲其他地区胡杨生长季起止日及生长期受WCI的影响较明显,中国绿洲处于中纬度西风带,西风环流的强弱影响气温变化。除柴达木盆地绿洲起始日以外,其他绿洲起止日和生长期都与CDE呈显著的高相关性,而CO<sub>2</sub>的过量排放是导致全球变暖的主要原因,CDE与胡杨生长季变化的高相关性进一步反映出胡杨生长季的变化对中国绿洲气候变化的响应十分敏感。

表3 中国绿洲胡杨生长季起止日、生长期影响因子的相关分析  
Tab. 3 Correlation analysis between the onset and upset date and growing period of *P. euphratica* and impact factors in Chinese oases

		APVII	APVAI	CA	TPI	WCI	CDE
起始日	阿拉善	0.243 <sup>*</sup>	0.529 <sup>***</sup>	0.029	-0.185	-0.399 <sup>***</sup>	-0.377 <sup>***</sup>
	北疆	0.393 <sup>***</sup>	0.583 <sup>***</sup>	-0.053	-0.177	-0.263 <sup>**</sup>	-0.246 <sup>*</sup>
	柴达木	-0.091	0.013	-0.108	-0.346 <sup>***</sup>	-0.092	-0.17
	河套	0.173	0.486 <sup>***</sup>	0.045	-0.306 <sup>**</sup>	-0.397 <sup>***</sup>	-0.582 <sup>***</sup>
	河西	0.181	0.580 <sup>***</sup>	-0.016	-0.434 <sup>***</sup>	-0.409 <sup>***</sup>	-0.319 <sup>**</sup>
	南疆	-0.21	0.342 <sup>***</sup>	-0.272 <sup>**</sup>	-0.540 <sup>***</sup>	-0.435 <sup>***</sup>	-0.321 <sup>**</sup>
终止日	阿拉善	-0.104	-0.273 <sup>**</sup>	-0.163	0.372 <sup>***</sup>	0.315 <sup>**</sup>	0.281 <sup>**</sup>
	北疆	-0.324 <sup>**</sup>	-0.523 <sup>***</sup>	-0.179	0.372 <sup>***</sup>	0.284 <sup>**</sup>	0.547 <sup>***</sup>
	柴达木	-0.340 <sup>**</sup>	-0.042	0.071	0.135	0.068	0.474 <sup>***</sup>
	河套	0.145	-0.211	-0.096	0.395 <sup>***</sup>	0.382 <sup>***</sup>	0.392 <sup>***</sup>
	河西	-0.03	-0.395 <sup>***</sup>	-0.122	0.581 <sup>***</sup>	0.308 <sup>**</sup>	0.406 <sup>***</sup>
	南疆	-0.230 <sup>*</sup>	-0.416 <sup>***</sup>	-0.012	0.481 <sup>***</sup>	0.236 <sup>*</sup>	0.529 <sup>***</sup>
生长期	阿拉善	-0.152	-0.358 <sup>***</sup>	-0.246 <sup>*</sup>	0.301 <sup>**</sup>	0.356 <sup>***</sup>	0.507 <sup>***</sup>
	北疆	-0.205	-0.368 <sup>***</sup>	-0.152	0.345 <sup>***</sup>	0.234 <sup>*</sup>	0.538 <sup>***</sup>
	柴达木	-0.393 <sup>***</sup>	-0.270 <sup>**</sup>	-0.062	0.192	0.059	0.423 <sup>***</sup>
	河套	-0.106	-0.363 <sup>***</sup>	-0.22	0.361 <sup>***</sup>	0.414 <sup>***</sup>	0.649 <sup>***</sup>
	河西	-0.169	-0.362 <sup>***</sup>	-0.197	0.445 <sup>***</sup>	0.335 <sup>**</sup>	0.488 <sup>***</sup>
	南疆	-0.222 <sup>*</sup>	-0.480 <sup>***</sup>	0.041	0.592 <sup>***</sup>	0.322 <sup>**</sup>	0.552 <sup>***</sup>

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示通过90%、95%、99%的显著性检验。

**4.5.2 地理参数的影响** 由于中国绿洲南北跨越14个纬度,地形起伏较大,故本文进一步分析了纬度和海拔高度对其生长季的影响。本文建立了胡杨生长季起始日、终止日、生长期日数与纬度、海拔高度的二元线性回归模型(置信度95%,R<sup>2</sup>分别为0.44、0.55和0.57,F分别为17、27和29,均大于F<sub>0.05,54</sub>=4.00):

$$Y_1 = 3.69X_1 + 0.016X_2 - 89.4 \tag{1}$$

$$Y_2 = -2.57X_1 - 0.012X_2 + 420 \tag{2}$$

$$Y_3 = -6.30X_1 - 0.028X_2 + 511 \tag{3}$$

式中:Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、Y<sub>3</sub>分别为胡杨生长季起始日、终止日、生长期日数;X<sub>1</sub>为纬度;X<sub>2</sub>为海拔高度。上述模型反映了纬度和海拔高度对胡杨生长季起止日和生长期日数的影响,纬度每向北推移1°,起始日推迟3.69 d,终止日提前2.57 d,生长期缩短6.3 d;海拔每上升100 m,起始日推迟1.6 d,终止日提前1.2 d,生长期缩短2.8 d。即海拔高度相同时,纬度越高,胡杨生长季起始的越晚,终止的越早,生长期越短;纬度相同时,海拔越高,胡杨生长季开始的越迟,终止的越早,生长期越短。显然,纬度对胡杨生长季起止日和



生长期的影响明显大于海拔高度,而起始日受纬度和海拔高度的影响比终止日更加显著,这与前文年际变化研究中得出的胡杨生长季起始日的提前趋势较终止日推迟趋势更为显著的结论一致。

**4.5.3 中国绿洲胡杨年生长季起止日、生长期与月平均气温的关系** 本文对胡杨年生长季起始日、终止日和生长季天数与3月、10月、3-10月平均气温进行相关分析,进一步探讨胡杨生长季变化与气温之间的响应机制(图7)。结果表明,中国绿洲胡杨生长季起始日与3月平均气温呈显著负相关,相关系数达 $-0.875$  ( $\alpha \geq 0.001$ ),其中,南疆绿洲相关性最高,高达 $-0.920$  ( $\alpha \geq 0.001$ ),柴达木盆地绿洲最低,仅为 $-0.265$  ( $\alpha \geq 0.05$ ),但柴达木盆地绿洲胡杨起始日与4月均温的相关性为 $-0.571$  ( $\alpha \geq 0.001$ ),表明柴达木盆地绿洲胡杨生长季起始日受4月气温的影响更加明显,这与柴达木盆地绿洲海拔较高,胡杨生长季起始较晚有关。中国绿洲胡杨生长季终止日与10月平均气温呈显著的正相关,相关系数达 $0.770$  ( $\alpha \geq 0.001$ ),且各绿洲终止日均与10月均温呈显著正相关,表明10月气温越高,胡杨生长季终止的越迟,其中北疆绿洲相关系数最大,为 $0.815$  ( $\alpha \geq 0.001$ )。胡杨生长期天数与3-10月平均气温呈极显著正相关,相关系数高达 $0.897$  ( $\alpha \geq 0.001$ ),且各绿洲生长期天数均与3-10月平均气温呈显著正相关,相关系数在 $0.606 \sim 0.854$  ( $\alpha \geq 0.001$ )之间,表明3-10月气温越高,胡杨生长期天数越长,其中北疆绿洲相关性最高。

气温是影响中国木本植物物候变化的主导气象因子<sup>[18]</sup>,它可以控制物候期的迟早,且从上述统计分析得知,胡杨年生长季与对应月份平均气温有较大相关性,故建立胡杨年生长季起始日、终止日及生长期与对应月份平均气温之间的回归方程(其中置信度95%; $R^2$ 分别为 $0.77$ 、 $0.59$ 和 $0.81$ ;  $F$ 值分别为 $177$ 、 $78$ 和 $223$ ,均大于 $F_{0.05,54}=4.00$ )

$$Y_1 = -2.21X_3 + 84.78 \quad (4)$$

$$Y_2 = 2.76X_4 + 280.58 \quad (5)$$

$$Y_3 = 7.78X_5 + 116.64 \quad (6)$$

式中: $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 分别为胡杨生长季起始日、终止日、生长期天数; $X_3$ 为3月平均气温; $X_4$ 为10月平均气温; $X_5$ 为3-10月平均气温。

该模型能够很好地反映胡杨生长季变化对气温变化的响应程度。模型计算结果表明,如果3月平均气温升高 $1^\circ\text{C}$ ,中国绿洲胡杨生长季起始日提前 $2.21\text{ d}$ ;如果10月平均气温升高 $1^\circ\text{C}$ ,终止日将推迟 $2.76\text{ d}$ ,这与陈效逯研究中国温带地区植被得出秋季日均温每升高 $1^\circ\text{C}$ ,生长季结束日期推迟 $2.6\text{ d}$ 的结论相似<sup>[35]</sup>;如果3-10月平均温度升高 $1^\circ\text{C}$ ,生长期将延长 $7.78\text{ d}$ 。可见胡杨生长对全球变暖的响应是敏感的。

## 5 结论

(1) 近56年来,中国绿洲胡杨年生长季有显著的起始日提前、终止日推迟、生长期

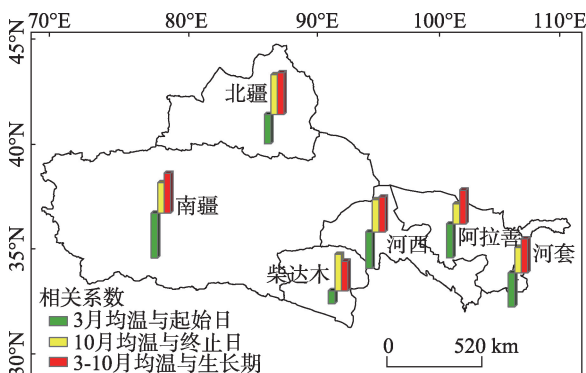


图7 中国绿洲胡杨生长季起止日、生长期与所在月及时段平均气温的相关分析

Fig. 7 Correlation analysis between the onset and upset date and growing period of *P. euphratica* and mean monthly temperatures in Chinese oases

延长的变化趋势,变化倾向率分别为 $-1.34\text{ d}/10\text{a}$ 、 $1.33\text{ d}/10\text{a}$ 、 $2.66\text{ d}/10\text{a}$  ( $\alpha \geq 0.001$ ),其中南疆绿洲胡杨生长季起始日最早、终止日最晚、生长期最长,柴达木盆地绿洲反之。

(2) 中国绿洲胡杨生长季起止日及生长期空间差异显著,但变化特征一致,均呈现出由西南向东北起始日推迟、终止日提前、生长期缩短的变化规律,且此规律在新疆绿洲表现最为明显。河套绿洲起始日提前趋势最明显,终止日推迟趋势最小,南疆绿洲起始日提前趋势和生长期延长趋势都最小,而生长期延长趋势最大在阿拉善绿洲,终止日推迟趋势最大在北疆绿洲。

(3) 突变分析表明,胡杨生长季起止日及其生长期分别在2001年、1989年、1996年发生突变,显然终止日对气候变暖的响应更加敏感。Morlet小波功率谱分析表明,胡杨生长季起止日和生长期分别存在3.56~7.14 a不等的短周期特征,并与厄尔尼诺2~7 a的周期吻合,起始日与大气环流2~4 a的准周期相一致。

(4) 成因分析表明,研究区胡杨生长季起止日及生长期主要受APVAI、TPI、WCI和CDE的影响,与上述小波功率谱分析得出的周期结果相一致。

纬度每向北推移 $1^\circ$ ,起始日推迟3.69 d,终止日提前2.57 d,生长期缩短6.3 d;海拔每上升100 m,起始日推迟1.6 d,终止日提前1.2 d,生长期缩短2.8 d。显然纬度对胡杨生长季的影响明显大于海拔高度;起始日受纬度和海拔高度的影响比终止日更加显著。

胡杨生长季起止日及生长期分别与3月、10月、3-10月的均温呈显著相关,相关系数分别为 $-0.875$ 、 $0.770$ 、 $0.897$  ( $\alpha \geq 0.001$ )。3月均温升高 $1^\circ\text{C}$ ,起始日提前2.21 d;10月均温每升高 $1^\circ\text{C}$ ,终止日推迟2.76 d;3-10月均温每升高 $1^\circ\text{C}$ ,生长期延长7.78 d。

## 参考文献(References)

- [1] Qin Dahe, Thomas Stocker, 259 Authors and TSU (Bern & Beijing). Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 2014, 10(1): 1-6. [秦大河, Thomas Stocker, 259名作者和TSU(驻伯尔尼和北京). IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.]
- [2] Chmielewski F M, Rötter T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.
- [3] Fang Xiuqi, Yu Weihong. Progress in the studies on the phenological responding to global warming. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 714-719. [方修琦, 余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述. 地球科学进展, 2002, 17(5): 714-719.]
- [4] Pei Shunxiang, Guo Quanshui, Xin Xuebing, et al. Research on plant phenological responses to climate change abroad. *World Forestry Research*, 2009, 22(6): 31-37. [裴顺祥, 郭泉水, 辛学兵, 等. 国外植物物候对气候变化响应的研究进展. 世界林业研究, 2009, 22(6): 31-37.]
- [5] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397(6721): 659.
- [6] Schwartz M D, Reiter B E. Changes in North American spring. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(8): 929-932.
- [7] Fu Y H, Campioli M, Demarée G, et al. Bayesian calibration of the Unified budburst model in six temperate tree species. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56: 153-164.
- [8] Qiang L, Yongshuo H. Fu, Zaichun Z, et al. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology. *Global Change Biology*, 2016, 22: 3702-3711.
- [9] Roetzer T, Wittenzeller M, Haeckel H, et al. Phenology in central Europe-differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 60-66.
- [10] 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. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 82-87.
- [11] Beaubien E G, Freeland H J. Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 53-59.
- [12] Fitchett J M, Grab S W, Thompson D I, et al. Spatio-temporal variation in phenological response of citrus to climate change in Iran: 1960-2010. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2014, 198/199: 285-293.

- [13] Szabó B, Vincze E, Czúcz B. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(9): 1347-1356.
- [14] Defila C, Clot B. Phytophenological trends in Switzerland. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 203-207.
- [15] Juknys R, Kanapickas A, Šveikauskaitė I, et al. Response of deciduous trees spring phenology to recent and projected climate change in Central Lithuania. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(10): 1589-1602.
- [16] Cola G, Failla O, Maghradze D, et al. Grapevine phenology and climate change in Georgia. *International Journal of Biometeorology*, 2016: 1-13.
- [17] Ge Quansheng, Dai Junhu, Zheng Jingyun. The progress of phenology studies and challenges to modern phenology research in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(3): 310-316. [葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展与中国现代物候学面临的挑战. *中国科学院院刊*, 2010, 25(3): 310-316.]
- [18] Zang Fuchun. Effects 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.]
- [19] 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.]
- [20] Gao Qi, Chen Jing, Yan Fang, et al. Phenological characteristics of herbaceous plants in Hebei Province and their responses to climate warming. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 600-605. [高祺, 陈静, 阎访, 等. 河北省草本植物物候特征及其对气候变暖的响应. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 600-605.]
- [21] 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.]
- [22] 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.]
- [23] Chang Zhaoqiang, Qiu Guoyu, Zhao Ming, et al. Responses of plant phenology to climate warming in Minqin desert area. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5195-5206. [常兆丰, 邱国玉, 赵明, 等. 民勤荒漠区植物物候对气候变暖的响应. *生态学报*, 2009, 29(10): 5195-5206.]
- [24] Chen Xiaoqi, Yu Rong. Spatial and temporal variations of the vegetation growing season in warm-temperate Eastern China during 1982 to 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 41-51. [陈效述, 喻蓉. 1982-1999年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化. *地理学报*, 2007, 62(1): 41-51.]
- [25] Wei Qingju. *Populus Euphratica*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990: 7-21. [魏庆莒. 胡杨. 北京: 中国林业出版社, 1990: 7-21.]
- [26] Wang Shiji, Chen Binghao, Li Huqun. *Populus Euphratica*. Beijing: China Environmental Science Press, 1995: 16-18. [王世绩, 陈炳浩, 李护群. 胡杨林. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 16-18.]
- [27] Liu Puxing, Zhang Kexin. Climate characteristic of seasonal variation and its influence on annual growth period of *populus euphratica* Olive in Hexi Corridor in recent 55 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 882-888. [刘普幸, 张克新. 近55a来河西走廊荒漠绿洲区季节变化特征及其对胡杨年生长期的影响. *生态学报*, 2011, 31(3): 882-888.]
- [28] Zhao Minli, Liu Puxing, Zhu Xiaojuan, et al. Respond of *Populus euphratica* Oliv. Phenology to climate warming in the oasis of lower reaches of Heihe River from 1960 to 2010. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(10): 2108-2115. [赵敏丽, 刘普幸, 朱小娟, 等. 黑河下游绿洲胡杨物候期对1960-2010年气温变暖的响应. *西北植物学报*, 2012, 32(10): 2108-2115.]
- [29] Shen Yuancun, Wang Jiuwen, Wu Guanghe, et al. *Oasis of China*. Kaifeng: Henan University Press, 2001. [申元村, 汪久文, 伍光和, 等. 中国绿洲. 开封: 河南大学出版社, 2001.]
- [30] Li Jiangfeng. *Xinjiang Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 75. [李江风. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991: 75.]
- [31] Chen Xiaoqi, Peng Jiadong, Li Huimin. Seasonal and regional differences of air temperature changes in Inner Mongolia. *Geographical Research*, 2009, 28(1): 27-35. [陈效述, 彭嘉栋, 李慧敏. 内蒙古地区气温变化的季节和区域差异. *地理研究*, 2009, 28(1): 27-35.]
- [32] Li Qihu, Chen Yaning, Shen Yanjun, et al. Spatial and temporal trends of climate change in Xinjiang, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 1007-1018.
- [33] Shi Xinghe, Zhao Yanning, Dai Sheng, et al. Research on climatic change of Qaidam Basin since 1961. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(1): 123-128. [时兴合, 赵燕宁, 戴升, 等. 柴达木盆地40多年来的气候变化研究. *中国沙漠*, 2005, 25(1): 123-128.]

- [34] Wang Jingai. Chinese Geography Course. Beijing: Higher Education Press, 2007: 33. [王静爱. 中国地理教程. 北京: 高等教育出版社, 2007: 33.]
- [35] Chen Xiaoqiu, Xu Lin. Temperature controls on the spatial pattern of tree phenology in China's temperate zone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154/155: 195-202.

## Spatial and temporal response and its causes of the growing season of *Populus euphratica* to global warming in China's oases during 1960-2015

ZHANG Wenxia, LIU Puxing, FENG Qingrong, WANG Tianguang, WANG Tianqiang  
(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Based on the daily average temperature of 48 meteorological stations in Chinese oases of the distribution area of *Populus euphratica*, we analyzed spatio-temporal response of the onset and upset date of *P. euphratica*, and the dates of growing season to climate change, with the aid of methods including a multi-year trend line, Mann-Kendall mutation test, IDW under the ArcGIS software, Morlet wavelet power spectrum, and correlation analysis. The results indicate that in the past 56 years, the onset date of the growing season has advanced and the upset date has postponed; the dates of the growing period have gradually prolonged, with the trend rates being  $-1.34$  d/10a,  $1.33$  d/10a,  $2.66$  d/10a ( $\alpha \geq 0.001$ ), respectively. The spatial difference is extremely significant, which presents the following law: from the southwest to the northeast in Chinese oases, the onset date has postponed, the upset date advanced, and the growing period shortened. The mutation point of the onset and upset dates and growing period is observed in 2001, 1989, and 1996, respectively, and the upset date is more sensitive to climate warming. The cycles of the growing season of *P. euphratica* are 3.56-7.14 years, which is consistent with the cycle of the El Nino event, and the onset date cycles of 3.56 years and 4.28 years are consistent with that of atmospheric circulation. Cause analysis shows that the Asian polar vortex area index, the Qinghai-Tibet Plateau index, Westerly Circulation index, and the carbon dioxide emissions are the main reasons for the change of the growing season for *P. euphratica*, and consistent with the results of the periodic analysis. In addition, the influence of latitude in the growing season is significantly larger than that of altitude, while the onset date is more significant than the upset date in terms of latitude and altitude. Additionally, the onset and upset dates and growing period are significantly correlated with the average temperature of corresponding month, with the correlation coefficients being  $-0.875$ ,  $0.770$ , and  $0.897$ , respectively ( $\alpha \geq 0.001$ ). Specifically, if the March average temperature increases by  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the onset date will occur about 2.21 days earlier; if the October average temperature increases by  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the upset date will delay for 2.76 days; if the average temperature of March to October increases by  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the growing period will prolong for 7.78 days. This indicates that the change of *P. euphratica* in the growing season has a sensitive response to regional warming. This study is of great theoretical significance in understanding the response of Chinese vegetation to climate warming and ecological restoration.

**Keywords:** *P. euphratica*; annual growing season; global warming; response; Chinese oases