

不同分布区文冠果物候期的差异及其与地理-气候因子和结实性状的相关性

敖妍^{1a,1b,①}, 张宁^{1a}, 赵磊磊², 张永明², 由海德², 刘金凤³, 张行杰³

(1. 北京林业大学: a. 林学院, b. 国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100083;

2. 赤峰市翁牛特旗林业局, 内蒙古 赤峰 024500; 3. 胜利油田胜大生态林场, 山东 东营 257000)

摘要: 为明确文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)物候期的地理变异规律,在文冠果的主要分布区(内蒙古自治区、河北省和河南省)选择6个样地,采用定株观测方法,于2012年对文冠果的物候期进行观测,并分析了物候期与经度和纬度、气候因子和结实性状间的相关性。结果表明:在供试6个样地中,文冠果的芽萌动期、初花期、盛花期、末花期、展叶期、果速生期、果熟期、落果期、落叶期及总生长期均存在明显差异;其中,盛花期相差天数最多(40 d),果速生期相差天数最少(26 d)。产自河南省三门峡市陕县(分布区南缘)的文冠果落叶期最晚,但其他各物候期均最早,总生长期最长(199 d);而产自内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗坤都镇(分布区北缘)的文冠果落叶期最早,但其他各物候期均最晚,总生长期最短(148 d)。从结实性状看,6个样地文冠果的座果率和单位投影面积种子质量差异均较大,而种子含油率差异不明显;其中,产自河南省三门峡市陕县的文冠果座果率和单位投影面积种子质量均最低。相关性和回归分析结果表明:文冠果的大多数物候期间呈正相关,仅落叶期与其他物候期呈负相关;其中,除盛花期与果速生期无显著相关性外,花期的各物候期(初花期、盛花期和末花期)与果期的各物候期(果速生期、果熟期和落果期)均呈显著或极显著正相关。多数物候期与经度和纬度呈显著或极显著正相关,仅落叶期与经度和纬度分别呈显著和极显著负相关。总体上看,除落叶期外,文冠果各物候期与年均日照时数呈正相关,与其他气候因子多数呈负相关;其中,除果速生期和落果期外,其他物候期与年均温呈显著或极显著负相关。此外,仅总生长期与文冠果的座果率呈显著负相关,其他物候期与结实性状则无显著相关性。综合分析结果表明:文冠果的物候期呈现明显的地理变异规律,且气温是影响其物候期的主要气候因子。

关键词: 文冠果; 物候期; 结实性状; 地理-气候因子; 相关性分析; 回归分析

中图分类号: Q949.755.5; S718.45 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)02-0027-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.02.04

Differences in phenophases of *Xanthoceras sorbifolium* in different distribution areas and correlation of them with geographical-climatic factors and fruiting characters AO Yan^{1a,1b,①},

ZHANG Ning^{1a}, ZHAO Leilei², ZHANG Yongming², YOU Haide², LIU Jinfeng³, ZHANG Xingjie³
(1. Beijing Forestry University: a. College of Forestry, b. National Energy R & D Center for Non-food Biomass, Beijing 100083, China; 2. Forestry Bureau of Wengniuteqi of Chifeng, Chifeng 024500, China; 3. Shengda Ecological Forest Farm of Shengli Oil Field, Dongying 257000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(2): 27-34

Abstract: In order to clarify the geographical variation rule of phenophases of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge, six plots were selected in its main distribution areas (Inner Mongolia Autonomous Region, Hebei Province and He'nan Province), phenophases of *X. sorbifolium* were observed in 2012 by the method of fixed line observation, and the correlations of its phenophases with longitude and latitude, climatic factors

收稿日期: 2016-11-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31600241); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2015ZCQ-LX-02)

作者简介: 敖妍(1981—),女,达斡尔族,内蒙古呼伦贝尔人,博士,副教授,主要从事能源植物培育理论与技术方面的研究。

①通信作者 E-mail: aoyan316@163.com

and fruiting characters were evaluated. The results show that there are obvious differences in bud germination stage, early flowering stage, full flowering stage, late flowering stage, leaf-expansion stage, fruit fast-growing stage, fruit maturing stage, fruit dropping stage, deciduous stage and total growth period of *X. sorbifolium* among six plots tested. In which, difference in days is the most (40 d) during full flowering stage and that is the least (26 d) during fruit fast-growing stage. Deciduous stage of *X. sorbifolium* from Shanxian County in Sanmenxia City of He'nan Province (the southern edge of distribution area) is the latest, while other phenophases are all the earliest, and total growth period is the longest (199 d). However, deciduous stage of *X. sorbifolium* from Kundu Town of Alukeerqinqi in Chifeng City of Inner Mongolia Autonomous Region (the northern edge of distribution area) is the earliest, while other phenophases are all the latest, and total growth period is the shortest (148 d). In the view of fruiting characters, the differences in fruit setting rate and seed weight per projected area of *X. sorbifolium* among six plots are greater, but the difference in seed oil content is not obvious. In which, both fruit setting rate and seed weight per projected area of *X. sorbifolium* from Shanxian County in Sanmenxia City of He'nan Province are the lowest. The results of correlation and regression analyses show that there are positive correlations among most phenophases of *X. sorbifolium*, only there is a negative correlation between deciduous stage and other phenophases. In which, except that there is no significant correlation between full flowering stage and fruit fast-growing stage, there are significantly or extremely significantly positive correlations between phenophases of flower period (early flowering stage, full flowering stage and late flowering stage) and phenophases of fruit period (fruit fast-growing stage, fruit maturing stage and fruit dropping stage). There are significantly or extremely significantly positive correlations of most phenophases with longitude and latitude, only there are significantly or extremely significantly negative correlations of deciduous stage with longitude and latitude, respectively. On the whole, except deciduous stage, there are positive correlations of phenophases of *X. sorbifolium* with annual average sunshine hour, and most negative correlations with other climatic factors. In which, except fruit fast-growing stage and fruit dropping stage, there are significantly or extremely significantly negative correlations between other phenophases and annual mean temperature. In addition, only there is a significantly negative correlation between total growth period and fruit setting rate, while there is no significant correlation between other phenophases and fruiting characters. The comprehensive analysis results show that there is an obvious geographical variation rule of phenophases of *X. sorbifolium*, and temperature is the main climatic factor affecting its phenophases.

Key words: *Xanthoceras sorbifolium* Bunge; phenophase; fruiting characters; geographical-climatic factors; correlation analysis; regression analysis

文冠果 (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) 为无患子科 (Sapindaceae) 文冠果属 (*Xanthoceras* Bunge) 小乔木或大灌木, 又名文冠花、崖木瓜等, 主要分布在中国, 为木本油料树种^[1]; 其种子含油率高, 且具有结实早、易繁殖、适应性强、耐旱、耐寒和耐瘠薄等特点, 被列入《全国林业生物质能源发展规划(2011—2020年)》, 是中国最具开发前景的生物质液体燃料树种之一^[2-4]。

物候不仅是植物自身的生理现象, 也是植物对外部生境、气候、水文条件的综合反应; 了解物候期是进一步研究植物的形态结构和生理生态特性以及比较分析引种地与原产地生长规律的依据^[5-6]。文冠果的营养生长和生殖生长相互交错, 其花芽分化伴随着果实的生长发育, 生长期间的生境条件、气候变化和管理措施对文冠果的生长、开花、受精和座果有直接

影响, 进而影响其产量和质量, 因此, 对文冠果物候期进行深入观测和研究, 有助于了解文冠果的生长、开花和结实等生物学特性以及生长发育规律, 目前已有学者对文冠果物候期进行了一些研究^[7-8]。

文冠果在中国栽培或半野生于东北、华北和西北等地区, 由于分布范围广、气候差异较大, 不同区域文冠果的物候期有较大差异, 但目前人们对其物候期的地理变异仍缺乏足够的认识。对不同地理群体文冠果进行物候观测, 分析其物候期变异规律, 找出物候期与地理-气候因子间的关系, 对于文冠果的资源评价和利用、良种选育和配置及其生产栽培技术的引进、栽培管理方式的改进都具有重要的现实意义, 并可以为文冠果的引种、种苗调拨以及造林区划提供重要参考资料。

作者在文冠果的主要分布区(内蒙古自治区、河

北省和河南省)选择进入盛果期的6个林分为研究对象,对文冠果的物候期规律进行系统观测,并分析其物候期的变异规律以及物候期与地理-气候因子和结实性状的相关性,以期为合理利用气候资源指导文冠果种苗区划、确定适宜的栽培和抚育管理等生产措施提供基础数据。

1 样地概况和研究方法

1.1 样地概况

供试的6个样地分别位于内蒙古自治区赤峰市的翁牛特旗乌丹镇、阿鲁科尔沁旗坤都镇和阿鲁科尔沁旗天山镇以及河南省三门峡市陕县、河北省的张家口市蔚县和承德市市区,各样地的主要地理-气候因子概况和林分概况均见表1,各林分管理措施一致。

1.2 研究方法

于2012年对各样地的文冠果物候期进行观测。采取定株观测方法,在各样地内地势平坦的区域选择生长相对一致、树势健壮、彼此距一定间隔的样株5株,以各样株树冠阳面外围中下层枝条^[9-10]为观测部位,分别记录各样株的物候期,间隔3~5 d观测1次。文冠果物候期划分为芽萌动期(鳞片沿芽的纵

断面稍稍展开,尚未彼此分离)、初花期(约5%的花开放)、盛花期(约70%的花开放)、末花期(大部分花的柱头枯萎,始见落花)、展叶期(每个新梢上端的第1个或第2个叶序的叶片展开)、果速生期(果实体积迅速增大)、果熟期(果皮由绿色变为绿黄色,由光泽变为粗糙,尖端微裂;种子变为棕红色,最后呈黑色)、落果期(果实成熟后开裂并脱落)和落叶期(叶片枯黄脱落)。

在物候期观测的同时,对各样株的开花和结实性状进行观测。采用卷尺(精度1 cm)分别测量树冠南北和东西方向长度并计算平均值(L),按照公式“树冠投影面积= $(\pi \times L^2)/4$ ”计算树冠投影面积。在各样株的东、西、南、北4个方向随机选取4个花序,挂牌编号;于末花期统计各花序的可孕花数和座果数,并按照公式“座果率=(座果数/可孕花数) $\times 100\%$ ”计算座果率。各样株的种子成熟后单独采收,采用电子计数秤(精度0.01 g,上海英衡称重设备有限公司)称量各单株的种子总质量,按照公式“单位投影面积种子质量=单株种子总质量/树冠投影面积”计算单位投影面积种子质量。采用四分法^[11]取样,并用HCY-10核磁共振(NMR)含油率测量仪(武汉航空仪表有限公司)测定各样株的种子含油率。

表1 供试6个文冠果样地的基本概况

Table 1 Basic status of six plots of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge tested

样地 ¹⁾ Plot ¹⁾	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	年均温/°C Annual mean temperature	1月均温/°C Mean temperature in January	7月均温/°C Mean temperature in July	极端高温/°C Extreme high temperature	极端低温/°C Extreme low temperature	≥ 10 °C年积温/°C Annual accumulated temperature of ≥ 10 °C
S1	E119°00'	N42°57'	623	5.8	-12.5	22.5	39.8	-33.8	2 640
S2	E119°18'	N44°13'	550	5.5	-11.5	22.9	40.6	-42.0	2 800
S3	E120°03'	N43°10'	420	5.5	-11.0	21.0	42.1	-30.0	2 800
S4	E111°37'	N34°38'	760	13.5	-1.9	38.7	43.2	-19.1	4 276
S5	E114°25'	N39°45'	850	6.4	-12.3	22.1	38.6	-35.3	2 950
S6	E117°50'	N40°58'	510	9.2	-9.5	24.0	41.2	-27.9	3 590

样地 ¹⁾ Plot ¹⁾	年均日照 时数/h Annual average sunshine hour	年降水 量/mm Annual precipitation	年蒸发 量/mm Annual evaporation	无霜期/d Frostless period	土壤类型 Soil type	林龄/a Stand age	树高/m Tree height	地径/cm Ground diameter	树冠投影 面积/m ² Crown projected area
S1	2 923	320	2 235	130	栗钙土 Chestnut soil	44	3.20	15.33	8.36
S2	2 900	340	2 075	120	栗钙土 Chestnut soil	35	3.00	11.96	5.84
S3	3 050	350	2 067	150	栗钙土 Chestnut soil	29	1.70	4.83	2.90
S4	2 279	573	2 361	216	褐土 Cinnamon soil	42	2.30	8.39	5.91
S5	2 917	416	1 594	126	栗钙土 Chestnut soil	10	1.84	4.58	2.72
S6	2 570	527	2 000	130	褐土 Cinnamon soil	45	5.11	19.67	19.12

¹⁾ S1, S2, S3: 分别为内蒙古自治区赤峰市的翁牛特旗乌丹镇、阿鲁科尔沁旗坤都镇和阿鲁科尔沁旗天山镇 Wudan Town of Wengniuteqi, Kundu Town of Alukeerqinqi and Tianshan Town of Alukeerqinqi in Chifeng City of Inner Mongolia Autonomous Region, respectively; S4: 河南省三门峡市陕县 Shanxian County in Sanmenxia City of He'nan Province; S5: 河北省张家口市蔚县 Yuxian County in Zhangjiakou City of Hebei Province; S6: 河北省承德市市区 Urban district in Chengde City of Hebei Province.

1.3 数据处理和分析

在进行数据分析时,以1月1日为基准(0),将物候期数据平均值换算成距离1月1日的天数进行分析^[12]。利用一元线性回归模型分析物候期随经度和纬度的变化趋势,并对相关系数进行显著性检验,回归方程为“ $Y=a+b \times X$ ”(a和b分别为回归常数和回归系数,用最小二乘法估计;X为经度或纬度;Y为经过换算后的物候期平均值)。采用SPSS 16.0软件对数据进行相关性分析^[13]。

表2 供试6个样地文冠果物候期的比较

Table 2 Comparison on phenophases of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge in six plots tested

样地 ¹⁾ Plot ¹⁾	物候期(MM-DD) ²⁾ Phenophase (MM-DD) ²⁾									总生长期/d Total growth period
	BCS	EFS	FFS	LFS	LES	FFGS	FMS	FDS	DS	
S1	05-11	05-12	05-17	05-25	05-20	06-20	07-23	07-29	10-15	157
S2	05-16	05-14	05-21	05-31	05-24	07-06	08-01	08-10	10-11	148
S3	05-15	05-13	05-19	05-27	05-23	07-02	07-29	08-08	10-14	152
S4	04-14	04-06	04-11	04-22	04-20	06-10	06-30	07-10	11-15	199
S5	05-10	04-27	05-08	05-17	05-20	06-15	07-20	07-26	10-20	163
S6	05-13	05-03	05-10	05-21	05-18	06-24	07-25	08-05	10-24	164
D/d ³⁾	32	38	40	39	34	26	32	31	35	51

¹⁾ S1, S2, S3: 分别为内蒙古自治区赤峰市的翁牛特旗乌丹镇、阿鲁科尔沁旗坤都镇和阿鲁科尔沁旗天山镇 Wudan Town of Wengniuteqi, Kundu Town of Alukeerqinqi and Tianshan Town of Alukeerqinqi in Chifeng City of Inner Mongolia Autonomous Region, respectively; S4: 河南省三门峡市陕县 Shanxian County in Sanmenxia City of He'nan Province; S5: 河北省张家口市蔚县 Yuxian County in Zhangjiakou City of Hebei Province; S6: 河北省承德市市区 Urban district in Chengde City of Hebei Province.

²⁾ BGS: 芽萌动期 Bud germination stage; EFS: 初花期 Early flowering stage; FFS: 盛花期 Full flowering stage; LFS: 末花期 Late flowering stage; LES: 展叶期 Leaf-expansion stage; FFGS: 果速生期 Fruit fast-growing stage; FMS: 果熟期 Fruit maturing stage; FDS: 落果期 Fruit dropping stage; DS: 落叶期 Deciduous stage.

³⁾ D: 同一物候期最早和最迟日期间相差的天数 Difference in days between the earliest date and the latest date of the same phenophase.

的日期相差40 d;果速生期相差天数最少,最早和最晚的日期仅相差26 d;初花期和果熟期的变幅分别为4月6日至5月14日和6月30日至8月1日,分别相差38和32 d。除落叶期外,河南省三门峡市陕县样地的文冠果各物候期均最早,而内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗坤都镇样地的文冠果各物候期均最晚,两地的文冠果物候期相差明显。从总生长期来看,河南省三门峡市陕县样地的文冠果总生长期最长(199 d),而内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗坤都镇样地的文冠果总生长期最短(148 d),二者相差51 d。6个样地中,河南省三门峡市陕县样地文冠果的花期开始和结束均最早,与其他样地的文冠果花期不重叠;文冠果花期最长的是河北省张家口市蔚县样地(21 d),其次是河北省承德市市区样地(19 d)。

2.1.2 主要结实性状比较 供试6个样地的文冠果座果率、单位投影面积种子质量和种子含油率3个指标的观测结果见表3。

2 结果和分析

2.1 文冠果物候期和结实性状的比较

2.1.1 物候期的比较 根据不同物候期的判定标准,于2012年对6个样地的文冠果物候期进行观测,结果见表2。

由表2可见:供试6个样地的文冠果物候期存在明显差异。其中,盛花期相差天数最多,最早和最晚

表3 供试6个样地文冠果座果率、单位投影面积种子质量和种子含油率的比较

Table 3 Comparison on fruit setting rate, seed weight per unit projected area and seed oil content of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge in six plots tested

样地 ¹⁾ Plot ¹⁾	座果率/% Fruit setting rate	单位投影面积种子质量/g·m ⁻² Seed weight per projected area	种子含油率/% Seed oil content
S1	28.14	42.10	33.34
S2	48.43	53.84	32.45
S3	35.68	146.64	35.64
S4	23.14	14.38	34.24
S5	25.89	63.83	32.71
S6	25.12	66.77	29.80

¹⁾ S1, S2, S3: 分别为内蒙古自治区赤峰市的翁牛特旗乌丹镇、阿鲁科尔沁旗坤都镇和阿鲁科尔沁旗天山镇 Wudan Town of Wengniuteqi, Kundu Town of Alukeerqinqi and Tianshan Town of Alukeerqinqi in Chifeng City of Inner Mongolia Autonomous Region, respectively; S4: 河南省三门峡市陕县 Shanxian County in Sanmenxia City of He'nan Province; S5: 河北省张家口市蔚县 Yuxian County in Zhangjiakou City of Hebei Province; S6: 河北省承德市市区 Urban district in Chengde City of Hebei Province.

由表3可见:6个样地文冠果的座果率和单位投影面积种子质量差异较大,而种子含油率差异不明显。其中,座果率以内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗坤都镇样地最高(48.43%),河南省三门峡市陕县样地最低(23.14%),前者是后者的2.09倍;文冠果单位投影面积种子质量以内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗天山镇样地最高($146.64 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),河南省三门峡市陕县样地最低($14.38 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),前者是后者的10.2倍;文冠果种子含油率为29.80%~35.64%,仅河北省承德市市区样地的种子含油率在30%以下,其余样地的种子含油率均在32%以上。

2.2 相关性分析

2.2.1 文冠果不同物候期的相关性分析 文冠果不

同物候期间的相关系数见表4。由表4可见:文冠果的大多数物候期间呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关。其中,芽萌动期仅与落叶期呈显著负相关,与果速生期呈不显著($P > 0.05$)的正相关,与其他物候期均呈极显著正相关,表明芽萌动期越早,花期和果期的各物候期相应提前,而落叶期则越晚。在花期的各物候期(初花期、盛花期、末花期)与果期的各物候期(果速生期、果熟期、落果期)间,除盛花期与果速生期呈不显著正相关外,其余物候期间均呈显著或极显著正相关。落叶期与其他物候期均呈负相关,其中,落叶期除与果速生期和落果期无显著相关性外,与其他物候期均呈显著或极显著负相关,表明展叶越早、花期越早,落叶越晚。

表4 文冠果不同物候期的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients among different phenophases of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge¹⁾

物候期 Phenophase	相关系数 Correlation coefficient								
	BGS	EFS	FFS	LFS	LES	FFGS	FMS	FDS	DS
BGS	1.000								
EFS	0.933**	1.000							
FFS	0.970**	0.989**	1.000						
LFS	0.976**	0.985**	0.997**	1.000					
LES	0.989**	0.924**	0.969**	0.967**	1.000				
FFGS	0.767	0.834*	0.811	0.833*	0.706	1.000			
FMS	0.980**	0.957**	0.976**	0.987**	0.955**	0.877*	1.000		
FDS	0.942**	0.918**	0.926**	0.946**	0.891*	0.924**	0.982**	1.000	
DS	-0.813*	-0.921**	-0.918**	-0.903*	-0.840*	-0.803	-0.863*	-0.795	1.000

¹⁾ BGS: 芽萌动期 Bud germination stage; EFS: 初花期 Early flowering stage; FFS: 盛花期 Full flowering stage; LFS: 末花期 Late flowering stage; LES: 展叶期 Leaf-expansion stage; FFGS: 果速生期 Fruit fast-growing stage; FMS: 果熟期 Fruit maturing stage; FDS: 落果期 Fruit dropping stage; DS: 落叶期 Deciduous stage. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.2.2 文冠果物候期与经度和纬度的相关性分析

文冠果不同物候期与其产地的经度和纬度均有一定的相关性,根据供试6个样地文冠果物候期的观测资料建立文冠果主要物候期(Y)与经度(X_1)和纬度(X_2)的回归方程,结果见表5。

由表5可见:文冠果的物候期与产地的经度和纬度均有显著或极显著的相关性。除落叶期与经度呈显著负相关外,其他物候期与经度均呈显著或极显著正相关;其中,初花期、盛花期和末花期与经度均呈极显著正相关,即随经度增加,文冠果的花期呈现延后的趋势。除落叶期与纬度呈极显著负相关外,其他物候期与纬度均呈显著或极显著正相关,表明随纬度增大,文冠果的花期和果期也均呈现延后的趋势。另外,根据回归方程可以看出,不同物候期与经度和纬

度间具有不同的数量关系。此外,不同样地文冠果的物候期与产地的海拔间不存在相关性。

2.2.3 文冠果物候期与气候因子的相关性分析 供试6个样地的文冠果不同物候期与气候因子间的相关系数见表6。

由表6可见:总体上看,除落叶期外,文冠果各物候期与年均日照时数呈正相关,与其他气候因子均呈负相关。其中,除果速生期和落果期与年均温间的相关性未达到显著水平外,其他各物候期与年均温间的相关性均达到显著水平,表明文冠果的物候期受年均温影响较大;除落叶期外,文冠果各物候期与年均温间均呈负相关,表明年均温越高,芽萌动期、初花期、盛花期、末花期、展叶期、果熟期越早。此外,极端低温与芽萌动期和展叶期均呈显著负相关;年均日照时

数与芽萌动期、初花期、盛花期、末花期和展叶期均呈显著正相关,与落叶期呈显著负相关;年降水量与各开花物候期均呈显著负相关,但与落叶期呈极显著正相关;无霜期与芽萌动期和展叶期均呈极显著负相关,

表5 文冠果物候期(Y)与样地经度(X_1)和纬度(X_2)的回归分析结果

Table 5 Result of regression analysis of phenophases (Y) of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge with longitude (X_1) and latitude (X_2) of plots

物候期 ¹⁾ Phenophase ¹⁾	与经度的回归方程 Regression equation with longitude		与纬度的回归方程 Regression equation with latitude	
	方程 Equation	R^2	方程 Equation	R^2
BGS	$Y = -224.036 + 3.023X_1$	0.862*	$Y = 0.030 + 3.173X_2$	0.931**
EFS	$Y = -357.661 + 4.115X_1$	0.969**	$Y = -43.563 + 4.105X_2$	0.994**
FFS	$Y = -336.773 + 3.995X_1$	0.929**	$Y = -37.707 + 4.129X_2$	0.987**
LFS	$Y = -301.206 + 3.770X_1$	0.926**	$Y = -19.275 + 3.909X_2$	0.987**
LES	$Y = -339.496 + 4.058X_1$	0.829*	$Y = -43.410 + 4.383X_2$	0.921**
FFGS	$Y = -117.204 + 2.497X_1$	0.865*	$Y = 75.507 + 2.440X_2$	0.869*
FMS	$Y = -147.665 + 3.003X_1$	0.909*	$Y = 77.144 + 3.104X_2$	0.966**
FDS	$Y = -140.554 + 3.016X_1$	0.906*	$Y = 89.726 + 3.008X_2$	0.930**
DS	$Y = 498.921 - 1.761X_1$	-0.853*	$Y = 369.983 - 1.891X_2$	-0.942**

¹⁾ BGS: 芽萌动期 Bud germination stage; EFS: 初花期 Early flowering stage; FFS: 盛花期 Full flowering stage; LFS: 末花期 Late flowering stage; LES: 展叶期 Leaf-expansion stage; FFGS: 果速生期 Fruit fast-growing stage; FMS: 果熟期 Fruit maturing stage; FDS: 落果期 Fruit dropping stage; DS: 落叶期 Deciduous stage.

²⁾ R: 相关系数 Correlation coefficient. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表6 文冠果物候期与样地气候因子的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between phenophases of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge and climate factors of plots

物候期 ¹⁾ Phenophase ¹⁾	相关系数 ²⁾ Correlation coefficient ²⁾				
	年均温 Annual mean temperature	1月均温 Mean temperature in January	7月均温 Mean temperature in July	极端高温 Extreme high temperature	极端低温 Extreme low temperature
BGS	-0.901*	-0.197	-0.640	-0.541	-0.841*
EFS	-0.911*	-0.260	-0.570	-0.586	-0.691
FFS	-0.946**	-0.239	-0.620	-0.613	-0.790
LFS	-0.925**	-0.185	-0.655	-0.600	-0.786
LES	-0.946**	-0.266	-0.604	-0.616	-0.891*
FFGS	-0.675	0.337	-0.858	-0.199	-0.501
FMS	-0.885*	-0.059	-0.737	-0.491	-0.784
FDS	-0.792	0.063	-0.770	-0.338	-0.687
DS	0.938**	0.111	0.658	0.643	0.728

物候期 ¹⁾ Phenophase ¹⁾	相关系数 ²⁾ Correlation coefficient ²⁾				
	年均日照时数 Annual average sunshine hour	≥ 10 °C 年积温 Annual accumulated temperature of ≥ 10 °C	年降水量 Annual precipitation	年蒸发量 Annual evaporation	无霜期 Frostless period
BGS	0.839*	-0.034	-0.716	-0.484	-0.933**
EFS	0.842*	-0.549	-0.851*	-0.185	-0.821*
FFS	0.887*	-0.628	-0.847*	-0.329	-0.883*
LFS	0.858*	-0.465	-0.812*	-0.324	-0.894*
LES	0.905*	-0.727	-0.777	-0.539	-0.945**
FFGS	0.557	-0.141	-0.611	-0.034	-0.570
FMS	0.804	-0.149	-0.735	-0.361	-0.878*
FDS	0.687	0.107	-0.628	-0.283	-0.799
DS	-0.902*	0.842	0.958**	0.234	0.720

¹⁾ BGS: 芽萌动期 Bud germination stage; EFS: 初花期 Early flowering stage; FFS: 盛花期 Full flowering stage; LFS: 末花期 Late flowering stage; LES: 展叶期 Leaf-expansion stage; FFGS: 果速生期 Fruit fast-growing stage; FMS: 果熟期 Fruit maturing stage; FDS: 落果期 Fruit dropping stage; DS: 落叶期 Deciduous stage.

²⁾ *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

与初花期、盛花期、末花期、果熟期均呈显著负相关。此外,文冠果各物候期与1月均温、7月均温、极端高温、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温和年蒸发量均无显著相关性。

2.2.4 文冠果物候期与结实性状的相关性分析 供试6个样地的文冠果不同物候期与座果率、单位投影面积种子质量和种子含油率的相关系数见表7。

由表7可见,除落叶期和总生长期与文冠果座果率和单位投影面积种子质量分别呈负相关外,其他物候期与座果率和单位投影面积种子质量均呈正相关;而各物候期与种子含油率均呈负相关。其中,仅总生长期与座果率的相关性达到显著水平,各物候期与座果率、单位投影面积种子质量和种子含油率的相关性均未达到显著水平。

表7 文冠果物候期与结实性状的相关系数
Table 7 Correlation coefficient between phenophases of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge and fruiting characters

物候期 ¹⁾ Phenophase ¹⁾	相关系数 ²⁾ Correlation coefficient ²⁾		
	座果率 Fruit setting rate	单位投影面积 种子质量 Seed weight per projected area	种子含油率 Seed oil content
BGS	0.976	0.610	-0.264
EFS	0.993	0.573	-0.058
FFS	0.993	0.584	-0.105
LFS	0.954	0.563	-0.165
LES	0.986	0.589	-0.201
FFGS	0.986	0.601	-0.014
FMS	0.987	0.617	-0.205
FDS	0.968	0.654	-0.227
DS	-0.923	-0.492	-0.184
TGP	-0.999*	-0.590	0.155

¹⁾ BGS: 芽萌动期 Bud germination stage; EFS: 初花期 Early flowering stage; FFS: 盛花期 Full flowering stage; LFS: 末花期 Late flowering stage; LES: 展叶期 Leaf-expansion stage; FFGS: 果速生期 Fruit fast-growing stage; FMS: 果熟期 Fruit maturing stage; FDS: 落果期 Fruit dropping stage; DS: 落叶期 Deciduous stage; TGP: 总生长期 Total growth period.

²⁾ *: $P < 0.05$.

3 讨论和结论

文冠果分布广泛,根据其分布面积可以划分为集中分布区、次集中分布区和零星分布区^[14]。本研究观测样地选择了文冠果集中分布区的内蒙古自治区赤峰市的翁牛特旗乌丹镇、阿鲁科尔沁旗坤都镇和阿鲁科尔沁旗天山镇与河南省三门峡市陕县,以及次集中分布区的河北省的张家口市蔚县和承德市市区,这些地区基本代表了文冠果自然分布的北端(内蒙古

自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗坤都镇)至南端(河南省三门峡市陕县),地理位置和气候因子都具有代表性;从林分状况看,供试的文冠果林分均进入盛果期,生长结实性状比较稳定,因此,本研究选择的6个文冠果样地在地理分布及林分状况上均具有代表性和典型性。观测结果表明:各样地的文冠果物候期存在明显差异,这是文冠果对其分布地气候环境长期适应的结果。除落叶期外,各物候期最早均出现在河南省三门峡市陕县,而最晚均出现在内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗坤都镇,而这2个区域分别是文冠果自然分布的南端和北端,其中,位于北端的内蒙古自治区赤峰市阿鲁科尔沁旗坤都镇纬度高、气候较冷,导致文冠果生长期较短;而位于南端的河南省三门峡市陕县的年均温、1月均温和7月均温等气候因子在6个样地中均最高,且年降水量多、无霜期长,使文冠果的物候期提前。从育种角度看,位于河南省三门峡市陕县的文冠果花期开始和结束均最早,与其他区域分布的文冠果花期不遇,在进行杂交育种时应充分考虑这一物候期差异。

相关性分析结果表明:文冠果开始萌芽越早,进入花期和果期就越早,生长期也越长。说明叶芽膨大萌发是一个对植物发育有重大影响的物候期,因为叶芽膨大期提前将延长植物的发育期^[15]。此外,依据文冠果物候期发生的顺序以及各物候期的相关性,可以通过前期发生的物候期时间来推算后期物候期的发生时间。

随全球气候变暖,木本植物普遍表现为春季物候期提前、秋季物候期推迟^[16],文冠果的物候期表现也与此结论相吻合。文冠果大部分物候期与分布区域的经度和纬度呈正相关,呈现明显的地理变异规律。其中,纬度越高、气温越低,春季达到生长临界温度的日期越晚,文冠果的芽萌动期、花期、展叶期、果期也均延后,而且秋季植株停止生长的日期越早,落叶越早;而随经度增加,文冠果的花期有延后趋势,这与毛桃[*Prunus persica* (Linn.) Batsch]的花期呈现类似的变化特点^[17]。

本研究中,文冠果的花期物候期与年均温均呈显著或极显著负相关,这与“毛白杨(*Populus tomentosa* Carrière)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)和刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)的春季物候期与年均温呈极显著负相关”^[16]的研究结论基本一致。但旱柳和刺槐的落叶期与其前10~40 d的平均最低气温呈

显著正相关^[16],而本研究中7月均温与文冠果的落叶期也呈正相关,虽然无统计学意义,但也能说明7月均温越低,文冠果落叶越早。马利莘等^[7]认为,文冠果物候特征与有效积温存在极显著的线性函数曲线关系,本研究结果与这一结论一致,证实了影响文冠果这类早春植物开花的主要因子是温度^[9]。另外,本研究中,年均日照时数和年降水量与文冠果果实发育各物候期间的相关性均无统计学意义,可能与果实成熟期决定于植物本身对光周期及其周围环境因子的综合反应有关。

从文冠果的果实性状看,其座果率仅与总生长期呈显著负相关,生长期长,芽萌动较早,开花物候期也相应提前;但与此同时很多区域会出现突然降温以及大风现象,不利于授粉和受精,严重影响了文冠果的座果率;另外,这一特征还可能与文冠果的开花结实特性有关,文冠果的当年果实生长与第2年的花芽分化同时进行,其树体养分既要供应果实发育又要保证第2年花芽分化所需,生长期越长,花芽分化的过程越长,与果实发育竞争的养分就越多,营养供应不足易使座果率降低。文冠果的单位投影面积种子质量和种子含油率与其各物候期均无显著的相关性,表明文冠果种子的这2项性状受多因素的综合影响。

本研究仅对6个不同文冠果地理群体的物候期与气候因子的关系进行了探讨,如果能根据不同物候期对应的详细气候因子数据进行分析,则可以更有针对性地阐述文冠果物候期与气候因子的相互关系。自然物候是气象、水文、土壤、生态环境等多项因子综合影响的反映,影响植物物候的因子很多,内因有遗传因子和植物内源激素等,环境因子主要通过内因,特别是植物内源激素水平起作用,这是物候变化的本质^[18],因此,今后应关注环境因子和植物内因对文冠果物候期的综合影响效应以及温度对其物候期规律影响的生物学过程分析。

参考文献:

[1] 李军,李霞冰,姚家彪.文冠果油中脂肪酸成分的色-质谱法鉴定[J].植物资源与环境,1993,2(2):28-32.

- [2] LIU Y L, HUANG Z D, AO Y, et al. Transcriptome analysis of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge): a potential oil-rich seed tree for biodiesel in China [J]. PLoS One, 2013, 8(9): e74441.
- [3] AO Y, WANG Y W, CHEN L, et al. Identification and comparative profiling of microRNAs in wild-type *Xanthoceras sorbifolium* and its double flower mutant [J]. Genes & Genomics, 2012, 34: 561-568.
- [4] 敖妍,段劼,于海燕,等.文冠果研究进展[J].中国农业大学学报,2012,17(6):197-203.
- [5] 祁如英,王启兰,申红艳.青海草本植物物候期变化与气象条件影响分析[J].气象科技,2006,34(3):306-310.
- [6] 李荣平,周广胜,张慧玲.植物物候研究进展[J].应用生态学报,2006,17(3):541-544.
- [7] 马利莘,王力华,阴黎明,等.乌丹地区文冠果生物学特性及物候观测[J].应用生态学报,2008,19(12):2583-2587.
- [8] 古丽江·许库尔汗,张东亚,汪智军,等.新疆木垒县文冠果物候特征研究[J].安徽农业科学,2012,40(17):9356-9357,9391.
- [9] 莫正海,张计育,翟敏,等.薄壳山核桃在南京的开花物候期观察和比较[J].植物资源与环境学报,2013,22(1):57-62.
- [10] 夏洋洁,唐坚强,张光富,等.浙江天童国家森林公园5种常绿阔叶植物的一次和二次抽枝进程[J].植物生态学报,2013,37(3):220-229.
- [11] 黎章矩,华家其,曾燕如.油茶果实含油率影响因子研究[J].浙江林学院学报,2010,27(6):935-940.
- [12] 李德.近30年淮北平原冬小麦物候期演变特征[J].气象科技,2009,37(5):607-612.
- [13] 高素萍,张硕,吴佩纹.二型植物蓝花丹开花物候特征观察及其生态意义分析[J].植物资源与环境学报,2015,24(1):84-90.
- [14] 牟洪香.木本能源植物文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)的调查与研究[D].北京:中国林业科学研究院林业研究所,2006:20-25.
- [15] 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[J].世界林业研究,2009,22(6):31-37.
- [16] 李瑞英,孙东宝,江晓东.鲁西南木本植物物候期对气候变暖的响应[J].中国农业气象,2014,35(2):135-140.
- [17] 裴顺祥.我国高纬度地区典型植物及全国广布种毛桃、山桃物候对气候变化的响应[D].北京:中国林业科学研究院,2011:62-65.
- [18] 宣继萍,周志芳,刘建秀,等.结缕草属(*Zoysia* Willd.)植物物候期的差异分析[J].植物资源与环境学报,2008,17(3):53-57.

(责任编辑:郭严冬)