

不同分布区文冠果种实性状对生态因子的响应

张 肖^{1,2},敖 妍^{1,2*},刘觉非³,赵磊磊⁴,由海德⁴

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083;
2. 北京林业大学 国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100083;
3. 赤峰市林业种苗站,内蒙古 赤峰 024000;4. 赤峰市翁牛特旗林业局,内蒙古 赤峰 024500)

摘要:为揭示不同分布区文冠果种实性状与生态因子之间的关系,以7个群体的文冠果植株为研究对象,对13个种实性状进行观测。采用相关性分析、回归分析等方法,明确影响文冠果种实性状的主导生态因子及其作用规律。结果表明,不同分布区文冠果种实性状差异均极显著($P<0.01$),单位投影面积种子产量、结果数、单果质量等产量性状的变异系数较大,果实纵径、果实横径、种子纵径、种子横径等种实形态性状变异系数较小。种实性状受多个主要生态因子共同作用,且与各因子间存在显著线性关系。综上所述,文冠果种实性状呈现明显的地理变异规律,生态因子对文冠果的表型性状影响显著。

关键词:文冠果;种实性状;生态因子

中图分类号:S722.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)05-0085-06

Responses of Fruit and Seed Characters of *Xanthoceras sorbifolium* to Ecological Factors in Different Distribution Areas

ZHANG Yi^{1,2},AO Yan^{1,2*},LIU Jue-fei³,ZHAO Lei-lei⁴,YOU Hai-de⁴

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083 China;
2. National Energy R&D Center for Non-food Biomass, Beijing Forestry University, Beijing 100083 China;
3. Forestry Seedling Station of Chifeng City, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China;
4. Wengniuteqi Forestry Bureau of Chifeng, Chifeng 024500, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to clarify the relations between fruit and seed characters of *Xanthoceras sorbifolium* and ecological factors, 13 fruit and seed characters of *X. sorbifolium* individuals in seven populations were observed. Correlation analysis and regression analysis were used to reveal the dominant ecological factors that affected fruit and seed characters and the function rules. The results showed that there were extremely significant differences ($P<0.01$) in fruit and seed characters among different populations. The relatively high variation coefficients were observed in yield characters, including seed yield per unit projective area, fruit number and single fruit weight. While the relatively low variation coefficient occurred in fruit and seed form characters including fruit length, fruit width, seed length and seed width. Fruit and seed characters were affected by several major ecological factors, and there were significant linear relationships between fruit and seed characters and those ecological factors. In conclusion, there is an obvious geographical variation pattern for fruit and seed characters, and ecological factors significantly affected the characters of *X. sorbifolium*.

Key words: *Xanthoceras sorbifolium*; fruit and seed character; ecological factor

收稿日期:2019-01-02 修回日期:2019-03-06

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

作者简介:张 肖,男,硕士,研究方向:能源植物培育理论与技术。E-mail:819300245@qq.com

* 通信作者:敖 妍,女,博士,副教授,研究方向:能源植物培育理论与技术。E-mail:aoyan316@163.com

近年来,由于能源危机和环境恶化,发展绿色环保可再生的生物质能源已成为全球的研究热点。文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)作为我国北方地区的主要生物质能源树种,也备受关注。文冠果为无患子科文冠果属植物,在我国16个省市区都有分布^[1],具有耐寒、耐旱、耐瘠薄等特性^[2]。其种子和果实具有极高的综合利用价值,种子含油率高,可用于制作食用油和生物柴油的原材料;种仁含有丰富的脂肪酸、蛋白质等,可直接用于食品加工;果壳中的乙醇提取物、总皂苷等可入药^[3]。

由于分布范围广,所处环境条件差异大,在长期进化过程中,文冠果形成了丰富的种实性状变异^[4]。张雷等^[5]、张晓燕^[6]、牟洪香^[7]对不同地区文冠果的种实性状进行调查,发现不同生态环境条件下文冠果结果数、种子大小、含油率等性状差异较大。尽管文冠果种实性状变异研究已有一定进展,但其地理变异规律仍不清楚,性状与环境间的关系仍不明确^[8]。因此,研究不同群体多种生态因子对文冠果种实性状的综合影响,对文冠果适宜气候区的划分

和栽培管理措施的制定具有重要意义。本试验以文冠果在我国主要分布区内的7个群体的植株为研究对象,对种实性状与生态因子的相关性进行研究,建立了文冠果种实性状与生态因子之间的量化关系,明确了影响文冠果种实性状的主导生态因子及其作用规律,以期为今后文冠果资源保护和开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于2017年在文冠果主要分布区内选择7个群体进行采样,分别为内蒙古赤峰市坤都镇(KD)、内蒙古赤峰市天山镇(TS)、内蒙古赤峰市乌丹镇(WD)、内蒙古赤峰市朱代沟(ZDG)、河北省承德市(CD)、河北省张家口市蔚县(YX)和河南省三门峡市陕县(SX)。各文冠果群体林龄为40~45 a,均已进入盛果期;根据每个采样点的地理坐标,从中国气象数据网获取年均温、年日照时数、年降水量等环境因子数据,各群体生态因子见表1。

表1 不同群体生态因子

Table 1 Ecological factors in different populations

群体	地理位置	海拔/m	年均温/℃	绝对最高温/℃	绝对最低温/℃	≥10℃年积温/℃	年日照时数/h	年降水量/mm	年蒸发量/mm
KD	119°18'E, 44°13'N	420	5.8	41.1	-37.6	2 655	2 911	322	2 081
TS	120°03'E, 43°10'N	550	5.6	42.5	-34.2	2 773	3 063	363	2 072
WD	119°00'E, 42°57'N	510	6.1	40.2	-33.4	2 658	2 935	331	2 241
ZDG	119°16'E, 42°56'N	500	5.7	39.8	-32.7	2 664	2 961	362	2 050
CD	118°50'E, 40°58'N	550	9.4	41.5	-27.6	3 599	2 582	540	2 002
YX	114°25'E, 39°45'N	850	6.7	39.0	-35.0	2 963	2 922	433	1 598
SX	111°37'E, 34°38'N	760	13.8	43.5	-18.9	4 281	2 284	580	2 365

1.2 种实性状观测

在每个群体内分别挑选长势良好、病虫害较少的100个样株进行种实采集和性状观测,单株采集间隔>20 m。调查所有样株的冠幅,果实成熟后按照单株采收果实、种子,测定各样株果实和种子鲜重,同时记录单株结果数。每一样株采用四分法选取20个果实,记录每果种子数,用电子游标卡尺测量果实的纵径、横径、果皮厚,取平均值作为最终分析数据;在选取的20个果实中,采用四分法选取50粒种子,测定种子纵径、横径,取平均值;种子含油率的测定方法参照GB/T15690—1995^[9],采用HCY-10核磁共振含油量仪(武汉航空仪表有限公司)测定。计算单果质量=单株果实鲜重/结果数;单位投影面积种子产量=单株种子鲜重/冠幅;千粒重=单株种子鲜重/每果种子数/结果数×1000;果形指数=果实纵径/果实横径;种形指数=种子纵径/种子横径^[8]。

1.3 统计方法

数据处理采用SPSS 20.0软件完成。采用单因素方差分析研究不同群体文冠果种实性状的差异;计算种实性状与生态因子间的Pearson相关系数^[10];分别以各生态因子为自变量,种实性状为因变量进行多元逐步回归分析^[11]。

2 结果与分析

2.1 不同群体文冠果种实性状比较

对不同群体文冠果种实性状进行方差分析,结果见表2,不同群体间13个种实性状均极显著差异($P<0.01$)。其中,KD的单位投影面积种子产量、每果种子数、结果数、单果质量和千粒重在7个群体中均最大;TS的种形指数最大;ZDG的果实纵径、果实横径、果皮厚、果形指数均最大;CD的种子纵径和种子横径最大;YX的种子含油率最高。

表2 不同群体文冠果种实性状(均值±标准差)

Table 2 Fruit and seed characters of *X. sorbifolium* in different populations(Mean±Std)

性状	KD	TS	WD	ZDG	CD	YX	SX	总体均值	F值
单位投影面积种子产量/(kg·m ⁻²)	0.16±0.06	0.13±0.06	0.08±0.04	0.13±0.07	0.06±0.03	0.05±0.03	0.05±0.02	0.09±0.04	28.32**
每果种子数	18.2±3.4	16.2±2.7	15.4±4.0	17.1±3.0	16.5±3.7	14.1±3.5	13.8±3.5	15.6±3.7	19.25**
结果数	78.2±34.6	23.0±8.9	25.0±12.1	50.4±24.6	56.1±24.7	29.6±10.6	11.5±5.2	38.0±17.6	49.33**
单果质量/g	47.57±20.97	29.13±15.65	32.80±16.00	40.28±16.47	36.72±18.72	16.22±7.77	42.61±19.74	37.37±17.76	63.26**
千粒重/kg	1.46±0.33	1.32±0.19	1.01±0.42	1.29±0.59	0.88±0.29	0.84±0.27	0.86±0.27	1.03±0.32	37.33**
果实纵径/cm	4.96±0.55	4.66±0.65	4.10±0.71	5.57±0.75	4.92±0.79	5.55±0.69	4.48±0.67	4.59±0.87	95.34**
果实横径/cm	4.41±0.60	4.16±0.53	4.76±0.66	5.20±0.57	5.11±0.76	4.67±0.53	4.59±0.62	4.55±0.75	52.11**
果皮厚/cm	0.51±0.08	0.52±0.07	0.50±0.07	0.55±0.08	0.45±0.08	0.46±0.07	0.41±0.06	0.47±0.08	54.25**
果形指数	1.04±0.07	1.02±0.06	0.96±0.10	1.11±0.13	0.95±0.08	1.07±0.08	1.02±0.09	1.02±0.11	38.34**
种子纵径/cm	1.40±0.14	1.34±0.22	1.32±0.21	1.36±0.14	1.50±0.12	1.37±0.20	1.21±0.13	1.31±0.21	45.21**
种子横径/cm	1.35±0.14	1.14±0.21	1.13±0.14	1.28±0.13	1.43±0.18	1.26±0.10	1.29±0.12	1.23±0.20	70.09**
种形指数	1.04±0.10	1.22±0.31	1.10±0.19	1.08±0.08	1.04±0.23	1.11±0.08	1.05±0.09	1.10±0.18	9.28**
种子含油率/%	32.41±4.03	30.92±3.93	32.35±4.74	33.50±5.03	34.74±3.81	34.94±3.77	32.80±3.45	32.11±4.47	13.55**

注: ** 表示在 0.01 水平差异极显著。

计算各种实性状的变异系数(表3),单位投影面积种子产量、每果种子数、结果数、单果质量等产量性状的平均变异系数较大,其中单位投影面积种子产量变异系数最大(49.43%);果实纵径、果实横

径、果形指数、种子纵径、种子横径等种实形态性状的平均变异系数均较小,果形指数最小(8.49%)。而种子含油率作为文冠果的重要产油性状,平均变异系数并不大(12.74%)。

表3 不同群体文冠果种实性状变异系数

Table 3 Variation coefficients of fruit and seed characters of *X. sorbifolium* in different populations

性状	KD	TS	WD	ZDG	CD	YX	SX	平均值	%
单位投影面积种子产量	37.50	46.15	50.00	53.85	50.00	60.00	48.52	49.43	
每果种子数	18.68	16.67	25.97	17.54	22.42	24.82	21.90	21.14	
结果数	44.25	38.70	48.40	48.81	44.03	35.81	43.94	43.42	
单果质量	44.09	53.73	48.78	40.89	50.97	47.92	46.34	47.53	
千粒重	22.78	14.28	41.22	45.48	32.83	31.71	31.51	31.40	
果实纵径	11.09	13.95	17.32	13.46	16.06	12.43	14.78	14.16	
果实横径	13.61	12.74	13.87	10.96	14.87	11.35	13.42	12.97	
果皮厚	15.69	13.46	14.00	14.55	17.78	15.22	15.29	15.14	
果形指数	6.73	5.88	10.42	11.71	8.42	7.48	8.78	8.49	
种子纵径	10.00	16.42	15.91	10.29	8.00	14.60	12.75	12.57	
种子横径	10.37	18.42	12.39	10.16	12.59	7.94	12.18	12.01	
种形指数	9.62	25.41	17.27	7.41	22.12	7.21	14.25	14.75	
种子含油率	12.43	12.71	14.65	15.01	10.97	10.79	12.63	12.74	

2.2 文冠果种实性状与生态因子的相关性分析

对文冠果种实性状与生态因子进行相关性分析(表4)可见,单位投影面积种子产量、每果种子数、结果数、单果质量与经纬度均极显著正相关($P<0.01$),与海拔、年均温、绝对最低温和年蒸发量均极显著负相关;千粒重与海拔极显著负相关,与绝对最低温和年蒸发量极显著正相关;果实纵径、果实横径、果皮厚、果形指数与绝对最高温、绝对最低温、年蒸发量均显著($P<0.05$)或极显著负相关;种子纵径、种子横径与经纬度、海拔、年日照时数、年蒸发量极显著负相关,与年均温、绝对最高温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温和年降水量显著或极显著正相关;种形指数与海

拔、年蒸发量显著负相关,与绝对最低温显著正相关;种子含油率与海拔、年日照时数、年蒸发量显著或极显著正相关,与年降水量极显著负相关。

2.3 文冠果种实性状回归分析

2.3.1 种实性状与地理因子的回归分析 分别以经度(X_1)、纬度(X_2)和海拔(X_3)为自变量,各种实性状为因变量(Y)进行回归分析(表5)可见,单位投影面积种子产量、每果种子数、结果数、单果质量和千粒重等产量性状与经纬度均正相关,与海拔均负相关,表明随着经纬度升高,海拔降低,文冠果产量呈现增大趋势;果实纵径、果实横径、种子纵径、种子横径等种实形态性状与经度和海拔均负相关,表明

表 4 文冠果种实性状与生态因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between fruit and seed characters of *X. sorbifolium* and ecological factors

性状	经度	纬度	海拔	年均温	绝对最高温	绝对最低温	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温	年日照时数	年降水量	年蒸发量
单位投影面积种子产量	0.575**	0.699**	-0.526**	-0.591**	-0.040	-0.604**	-0.648**	0.683**	-0.634**	-0.636**
每果种子数	0.542**	0.577**	-0.587**	-0.633**	-0.565**	-0.678**	-0.725**	0.848**	-0.711**	-0.513**
结果数	0.694**	0.696**	-0.816**	-0.512**	-0.584**	-0.547**	-0.465*	0.058	-0.008	-0.556**
单果质量	0.658**	0.665**	-0.812**	-0.589**	-0.060	-0.630**	-0.046	0.039	-0.004	-0.640**
千粒重	0.042	0.047	-0.595**	0.026	0.051	0.743**	-0.025	0.021	-0.019	0.686**
果实纵径	-0.061	0.044	-0.014	-0.623**	-0.520**	-0.714**	-0.463*	0.528**	0.028	-0.894**
果实横径	-0.052	0.016	-0.054	-0.054	-0.462*	-0.532**	-0.010	0.050	0.060	-0.873**
果皮厚	-0.024	-0.012	-0.718**	0.576*	-0.655**	-0.467*	0.652**	-0.606**	0.685**	-0.723**
果形指数	-0.029	0.053	0.053	-0.531**	-0.509**	-0.684**	-0.621**	0.645**	-0.536**	-0.532**
种子纵径	-0.617**	-0.506**	-0.522**	0.613**	0.584**	0.473*	0.561**	-0.618**	0.711**	-0.744**
种子横径	-0.657**	-0.513**	-0.473*	0.525**	0.477*	0.008	0.665**	-0.546**	0.685**	-0.684**
种形指数	0.047	0.009	-0.479*	0.009	0.029	0.471*	0.004	0.025	0.033	-0.463*
种子含油率	-0.050	-0.041	0.587**	-0.026	0.044	0.015	-0.045	0.469*	-0.583**	0.464*

注: * 表示在 0.05 水平显著相关, ** 表示在 0.01 水平极显著相关。下同。

表 5 种实性状与地理因子的回归分析

Table 5 Regression analysis between fruit and seed characters and geographical factors

性状	与经度的回归方程		与纬度的回归方程		与海拔的回归方程	
	方程	R ²	方程	R ²	方程	R ²
单位投影面积种子产量	$Y = -1.117 + 0.011X_1$	0.689**	$Y = -0.386 + 0.010X_2$	0.554*	$Y = 0.211 - 0.0002X_3$	0.579*
每果种子数	$Y = -13.633 + 0.250X_1$	0.280	$Y = 4.010 + 0.281X_2$	0.395	$Y = 17.471 - 0.003X_3$	0.206
结果数	$Y = -434.741 + 4.054X_1$	0.272	$Y = -124.96 + 3.945X_2$	0.287	$Y = 91.277 - 0.089X_3$	0.325
单果质量	$Y = -18.048 + 0.166X_1$	0.283	$Y = -5.229 + 0.162X_2$	0.293	$Y = 3.904 - 0.004X_3$	0.275
千粒重	$Y = -47.431 + 0.723X_1$	0.292	$Y = 30.803 + 0.159X_2$	0.265	$Y = 53.805 - 0.027X_3$	0.311
果实纵径	$Y = 5.822 - 0.009X_1$	0.231	$Y = 3.723 + 0.025X_2$	0.362	$Y = 4.371 - 0.001X_3$	0.313
果实横径	$Y = 4.899 - 0.002X_1$	0.415	$Y = 3.936 + 0.018X_2$	0.392	$Y = 4.514 - 0.001X_3$	0.362
果皮厚	$Y = 0.243 - 0.002X_1$	0.374	$Y = 0.408 + 0.002X_2$	0.357	$Y = 0.539 - 0.001X_3$	0.328
果形指数	$Y = 1.199 - 0.002X_1$	0.354	$Y = 0.964 + 0.001X_2$	0.372	$Y = 0.872 + 0.001X_3$	0.259
种子纵径	$Y = 1.644 - 0.003X_1$	0.367	$Y = 1.409 - 0.002X_2$	0.359	$Y = 1.281 - 0.001X_3$	0.277
种子横径	$Y = 2.197 - 0.008X_1$	0.343	$Y = 1.463 - 0.005X_2$	0.382	$Y = 1.116 - 0.001X_3$	0.325
种形指数	$Y = 0.254 + 0.007X_1$	0.542*	$Y = 0.902 + 0.005X_2$	0.367	$Y = 1.183 - 0.0002X_3$	0.522*
种子含油率	$Y = 40.167 - 0.067X_1$	0.356	$Y = 35.591 - 0.079X_2$	0.371	$Y = 31.642 + 0.001X_3$	0.323

随着经度和海拔增加,文冠果果实、种子逐渐变小;种子含油率与经纬度负相关,与海拔正相关,表明随着经纬度降低,海拔升高,文冠果种子含油率逐渐增加。

2.3.2 种实性状与气候因子的回归分析 分别以各气候因子,即年均温(X_4)、绝对最高温(X_5)、绝对最低温(X_6)、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温(X_7)、年日照时数(X_8)、年降水量(X_9)和年蒸发量(X_{10})为自变量,种实性状为因变量(Y)进行逐步回归分析,舍去系数不显著($P > 0.05$)的自变量,得到最佳回归方程(表6)可见,绝对最高温、绝对最低温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温、年日照时数、年降水量和年蒸发量是影响单位投影面积种子产量、结果数、单果质量、果实纵径、果皮厚的

主要气候因子; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温和年日照时数是影响每果种子数的主要气候因子;绝对最低温和年蒸发量是影响千粒重、果形指数、果实横径、种子纵径、种形指数的主要气候因子;绝对最高温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温、年日照时数和年降水量是影响种子含油率的主要气候因子。

3 结论与讨论

3.1 不同群体文冠果种实性状变异规律

性状变异是植物适应不同生态环境的体现,表型变异越大,遗传变异的可能性越大^[12]。本研究对13个种实性状进行观测,结果表明,不同群体文冠果种实性状差异均极显著($P < 0.01$),说明种实性

表6 种实性状与气候因子的回归分析

Table 6 Regression analysis between fruit and seed characters and climate factors

性状	拟合的模型	R^2
单位投影面积种子产量	$Y = 0.341 + 0.036X_5 - 0.258X_6 - 0.003X_7 + 0.003X_8 - 0.016X_9 - 0.003X_{10}$	0.465**
每果种子数	$Y = -21.588 + 0.003X_7 + 0.011X_8$	0.685**
结果数	$Y = 2490.068 + 6.212X_5 + 3.683X_6 - 0.306X_7 - 0.364X_8 - 0.689X_9 - 0.192X_{10}$	0.327**
单果质量	$Y = 719.861 + 10.150X_5 + 1.183X_6 - 0.079X_7 - 0.215X_8 - 0.204X_9 - 0.089X_{10}$	0.363**
千粒重	$Y = 64.531 + 1.668X_6 + 0.013X_{10}$	0.477**
果实纵径	$Y = 339.983 + 4.738X_5 + 0.603X_6 - 0.030X_7 - 0.097X_8 + 0.126X_9 - 0.045X_{10}$	0.367**
果实横径	$Y = 3.395 - 0.013X_6 - 0.002X_{10}$	0.325**
果皮厚	$Y = 20.783 + 0.333X_5 + 0.034X_6 - 0.002X_7 - 0.006X_8 - 0.006X_9 - 0.003X_{10}$	0.425**
果形指数	$Y = 1.726 - 0.003X_6 - 0.0004X_{10}$	0.377**
种子纵径	$Y = 0.606 + 0.036X_6 - 0.0003X_{10}$	0.311*
种子横径	$Y = 2.222 - 0.005X_6 - 0.0002X_8 - 0.0002X_{10}$	0.406**
种形指数	$Y = 2.826 - 0.003X_6 - 0.001X_{10}$	0.275*
种子含油率	$Y = -67.436 + 1.582X_5 + 0.009X_7 + 0.027X_8 - 0.034X_9$	0.259*

状存在明显的地理遗传分化,具有较大的选择潜力。由表1可知,坤都群体的单位投影面积种子产量、每果种子数、结果数和单果质量均最大,其位于文冠果群体北端,经纬度高、海拔低,年降水量、年均温较低;蔚县群体的种子含油率最高,其位于文冠果群体相对靠南位置,经纬度低,海拔较高,热量、水分和光照条件较好。变异系数分析结果显示,单位投影面积种子产量、结果数、单果质量等产量性状变异程度较大,果实纵径、果实横径、种子纵径、种子横径等种实形态性状变异系数均较小,与无患子^[13]、毛梾^[14]种实性状的研究结果一致。文冠果种实性状存在丰富的遗传变异,且不同群体的环境异质性增强了种实性状的变异程度,为文冠果优良种质资源选择提供有利条件。

3.2 文冠果种实性状与地理因子的相关性规律

文冠果不同群体种实性状分化显著,与其群体地理位置差异有关^[7]。本研究选取的7个文冠果群体地理跨度较大,生态环境条件差异较大。文冠果种实性状呈现经纬度、海拔并存的变异模式,与川西云杉的研究结果一致^[15]。其中,文冠果产量性状如单位投影面积种子产量、结果数等与经纬度均正相关,与海拔负相关,表明随着经纬度升高,海拔降低,文冠果产量呈现增大趋势;同理,随着经度和海拔的增加,文冠果果实、种子逐渐变小,与小果白刺^[16]、红花油茶^[17]性状研究结果不同,表明不同植物对于地理因子的响应程度不同,与其自身遗传因素有关。随着纬度增加,文冠果果实偏大,种子反而偏小,果形指数和种形指数越大,与同科植物无患子种实性状研究结果相同^[18],表明在文冠果群体内,越往北种子、果实越趋近于长圆形。而且,实际调查中也发现,文冠果果实偏大时,一般种子个数就越多,但种

子偏小。

3.3 文冠果种实性状与气候因子的相关性规律

文冠果种实性状受多种因素综合影响,其中气温、光照、水分为主要的影响因子^[7]。相关性分析结果表明:产量性状与各温度因子均负相关,这与文冠果分布特点一致,其适生地区为我国寒冷干旱的北方地区,在湿热环境下生长不良甚至死亡,因此在一定范围内,随着温度的升高,文冠果产量呈现减少趋势;果实纵径、果实横径、果形指数与各温度因子均负相关,种子纵径、种子横径、种形指数与各温度因子均正相关,表明随着温度的上升,文冠果果实逐渐变小,种子逐渐增大,与麻风树^[19]性状研究结果不一致,说明温度对于不同植物种实形态性状的影响程度不同,而且与植物本身的生物学和生态学特性、分布特点有关。文冠果为喜光植物,其大部分种实性状与年日照时数正相关,表明随着年日照时数的增加,文冠果光合作用加强,体内有机物质不断积累,产量增加;同时光照充足条件下,有利于文冠果油脂的合成,因此其种子含油率增加。同理,各产量性状、种子含油率与年降水量负相关,即降水量过多,则光照减少,不利于其体内有机物和油脂的合成,而且容易引起根系腐烂;随着年降水量的增加,虽然产量性状、含油率降低,但是果实、种子形状增大,这与麻风树^[19]、暴马丁香^[20]、野生玫瑰^[21]的研究结果相同。

综上所述,文冠果分布广泛,各地地理位置、温度、水分、光照存在明显差异。这些差异影响着各群体文冠果的生长发育和表型性状,进而影响其种子产量和质量^[22-23],因此在选择文冠果种植基地时应充分考虑各地生态因子的差异。高产型文冠果的良种选育应重点考虑高经度、低海拔、温度较低、年日

照时数较高的地区;高油型文冠果的良种选育应考虑高海拔、温度较低、年日照时数较高的地区。

参考文献:

- [1] 石长春,肖建明,戚建华,等.文冠果种皮黑色素稳定性与抗氧化活性研究[J].西北林学院学报,2018,33(2):104-109.
SHI C C, XIAO J M, QI J H, et al. Stability and antioxidant of melanin from testae *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 33(2): 104-109. (in Chinese)
- [2] 敖妍,韩墨,赵磊磊,等.主要分布区文冠果类型的划分[J].西北林学院学报,2015,30(3):100-106.
AO Y, HAN M, ZHAO L L, et al. Type classification of *Xanthoceras sorbifolia* in main distribution areas [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 30(3): 100-106. (in Chinese)
- [3] 郭军战,张敏,费昭雪,等.文冠果数量性状的主成分分析及聚类分析研究[J].西北林学院学报,2012,27(2):66-69.
GUO J Z, ZHANG M, FEI S X, et al. Principal component analysis and cluster analysis quantitative characters of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 27(2): 66-69. (in Chinese)
- [4] 邓红,马玉娟,曹立强,等.7个不同栽培产地文冠果种仁品质特性差异[J].农产品加工:学刊,2013,2(3):4-12.
- [5] 张雷,王宝霞,季雪峰,等.内蒙古不同种源文冠果果实特征及种子含油率调查研究[J].内蒙古林业科技,2011,37(3):16-20.
- [6] 张晓燕.神东矿区不同种源地文冠果生长适宜性及耐盐性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [7] 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,2006.
- [8] 敖妍.木本能源植物文冠果类型划分、单株选择及相关研究[D].北京:中国林业科学研究院,2010.
- [9] 王以群,鲍元奇,张颖.GB/T15690-1995油籽含油量核磁共振测定法[S].北京:中国标准出版社,1995.
- [10] 杨庆珍,王增绘,付娟,等.黄芪化学成分与生态因子的相关性[J].应用生态学报,2015,26(3):732-738.
YANG Q Z, WANG Z H, FU J, et al. Correlation between chemical constituents and ecological factors of *Astragalus membranaceus* var. *mongolicus* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 732-738. (in Chinese)
- [11] 何忠俊,梁社往,丁颖,等.三七主根稳定碳同位素组成与生态因子的关系[J].生态环境学报,2015,24(4):561-568.
HE Z J, LIANG S W, DING Y, et al. Relationships between stable carbon isotopic composition in taproot of *Panax Notoginseng* and ecological factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 561-568. (in Chinese)
- [12] 林玲,王军辉,罗建,等.砂生槐天然群体种实性状的表型多样性[J].林业科学,2014,50(4):137-143.
LIN L, WANG J H, LUO J, et al. Phenotypic diversity of seed and fruit traits in natural populations of *Sophora moorcroftiana* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 50(4): 137-143. (in Chinese)
- [13] 刁松锋,邵文豪,姜景民,等.基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究[J].生态学报,2014,34(6):1451-1460.
DIAO S F, SHAO W H, JIANG J M, et al. Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1451-1460. (in Chinese)
- [14] 康永祥,赵宝鑫,袁玉洁,等.毛梾天然群体种实表型多样性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(9):107-117.
KANG Y X, ZHAO B X, YUN Y J, et al. Study on phenotypic diversity of seeds and fruits, characteristic in *Cornus walteri* [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2011, 39(9): 107-117. (in Chinese)
- [15] 辜云杰,罗建勋,吴远伟,等.川西云杉天然种群表型多样性[J].植物生态学报,2009,33(2):291-301.
- [16] 董昕,王磊,鲁仪增,等.山东稀有植物小果白刺天然群体表型变异研究[J].林业科学研究,2017,30(2):293-299.
DONG X, WANG L, LU Y Z, et al. Phenotypic variation of *Nitraria sibirica* natural populations in Shandong [J]. Forest Research, 2017, 30(2): 293-299. (in Chinese)
- [17] 黄佳聪,何俊,尹瑞萍,等.腾冲红花油茶自然和人工种群种实性状变异研究[J].北京林业大学学报,2010,32(5):94-101.
HUANG J C, HE J, YIN R P, et al. Variations of fruit and seed traits of natural and artificial populations in *Camellia reticulata* L. [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(5): 94-101. (in Chinese)
- [18] 邵文豪,刁松锋,董汝湘,等.无患子种实形态及经济性状的地理变异[J].林业科学研究,2013,26(5):603-608.
- [19] 惠文凯,陈晓阳,刘明骞,等.麻风树种源间种实性状变异研究[J].北京林业大学学报,2014,36(3):110-114.
HUI W K, CHEN X Y, LIU M Q, et al. Variations of fruit and seed traits of *Jatropha curcas* L. among provenances [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 110-114. (in Chinese)
- [20] 杨晓霞,冷平生,郑健,等.暴马丁香不同种源种子和幼苗的表型性状变异及其与地理—气候因子的相关性[J].植物资源与环境学报,2016,25(3):80-89.
YANG X X, LENG P S, ZHEN J, et al. Variation of phenotypic traits of seed and seedling of *Syringa reticulata* subsp. *amurensis* from different provenances and their correlations with geographic-climatic factors [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2016, 25(3): 80-89. (in Chinese)
- [21] 童冉,吴小龙,姜丽娜,等.野生玫瑰种群表型变异[J].生态学报,2017,37(11):3706-3715.
- [22] 万群芳,何景峰,张文辉,等.文冠果地理分布和生物生态学特性[J].西北农业学报,2010,19(9):178-185.
- [23] 侯元凯,黄琳,高巍,等.不同种源文冠果果实及种子表型性状变异的研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(7):20-24.
HOU Y K, HUANG L, GAO W, et al. Study on phenotypic character variation of fruits and seeds of *Xanthoceras sorbifolia* from different provenances [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(7): 20-24. (in Chinese)