

文冠果种子及苗期生长性状地理种源变异

赵阳, 毕泉鑫, 句娇, 于丹, 范思琪,
陈梦圆, 崔艺凡, 傅光辉, 王利兵*

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林业培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 研究不同种源文冠果 (*Xanthocerasorbifolium* Bunge) 的种子形态特征及在山东省安丘地区苗期性状差异, 了解文冠果不同种源变异特征, 为文冠果在山东安丘地区引种和遗传改良提供参考。 [方法] 以来自山东、河南、内蒙古、辽宁、黑龙江、河北、新疆、陕西等地的 27 个种源的文冠果种子为研究对象, 对其种子形态指标进行测定, 并在山东省安丘市开展种源试验。 [结果] 研究发现: 不同种源间文冠果表型性状均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 且这些差异可以稳定遗传 (遗传力均大于 0.9); 苗期苗高与种源地降水、年均气温及地径与降水之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 苗高与种源地纬度、年均日照及地径与年均日照呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 种子长、种子宽、种皮厚均与海拔呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。 [结论] 文冠果表型性状存在丰富的变异, 且受较强遗传控制; 文冠果苗期性状变异主要受降水、年均气温、年均日照 3 个环境主导因子的影响, 种子性状变异主要受海拔的影响。综合种源苗期生长状况, 初步筛选出山东东营、山东安丘、内蒙古库伦、辽宁关山和辽宁海城 5 个适合安丘地区育苗的速生种源。

关键词: 文冠果; 种子性状; 苗期性状; 地理变异; 种源试验

中图分类号: S759.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)01-0160-09

文冠果 (*Xanthocerasorbifolium* Bunge), 属无患子科 (Sapindaceae) 文冠果属 (*Xanthoceras* Bunge), 是我国特有的木本油料植物, 在我国分布广泛, 西至新疆、宁夏, 东北至黑龙江, 北至内蒙古, 南至河南, 种质资源丰富^[1], 且抗逆性较强, 是绿化荒山和改善环境的优良树种^[2]。文冠果种仁含油率高达 66.39%, 脂肪酸组成良好, 是理想的食用和工业用油树种^[2]。种仁蛋白的氨基酸种类丰富, 可以用作食品添加剂和乳化剂^[3]。同时, 种皮和果壳是活性炭的优质原料^[3]。因此, 文冠果是集绿化、食用和工业于一身的优良乡土经济树种, 具有良好的开发利用前景。

文冠果分布范围较广, 加上长期的地理隔离、自然选择和人工选择, 使其具有极其丰富的种内变异。种源试验可以了解种源的优劣和种源地理变异特征, 对参试种源进行区划, 同时对造林地区选出生产力高、适应性强的优良种源具有重要作用^[4-6]; 但目

前国内文冠果种源试验选取的种源较少, 仅限于较少种源范围内的试验, 参考价值不高^[7-10], 尤其是山东重点发展文冠果产业的安丘地区。本研究是课题组在对我国文冠果资源全面调查分析的基础上^[11], 以文冠果主要分布区的 27 个种源为研究对象, 在安丘地区开展种源试验, 分析文冠果地理种源变异特性, 可以为文冠果优良种源的筛选和种子调拨提供可靠依据, 有利于现有文冠果种质基因资源的选择、保存和利用, 也为文冠果遗传改良和引种推广提供了遗传背景和实验依据。

1 种源地、试验地概况

1.1 种源地概况

2016 年在文冠果主要分布区的山东、陕西、河南等 9 省市选择 27 个种源地采集文冠果种子。各参试种源采种点地理气候因子见表 1。

收稿日期: 2018-06-27 修回日期: 2018-12-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC050080506); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2018SY010)

* 通讯作者: 王利兵. E-mail: wlibing@caf.ac.cn

表1 文冠果27个种源的地理位置及气候因子状况
Table 1 Geography and climate conditions of *X. sorbifolium* provenances

种源号 Provenance number	种源 Provenances	纬度 N Latitude	经度 E Longitude	降水量/mm Annual precipitation	年均气温/℃ Annual mean temperature	海拔/m altitude	无霜期/d frost-free period	年均日照/h Annual average sunshine
1	黑龙江牡丹江	44°33'	129°37'	540.0	4.3	230.0	105	2 305.0
2	内蒙古奈曼	42°52'	120°39'	366.0	6.0	450.0	150	2 946.0
3	内蒙古库伦	42°44'	121°48'	425.0	6.6	365.0	145	2 979.0
4	内蒙古扎鲁特	44°34'	120°54'	383.0	6.6	263.5	139	2 883.0
5	内蒙古舍伯吐	44°01'	121°59'	342.0	7.1	167.5	202	2 892.0
6	内蒙古图布信	44°20'	123°02'	270.0	7.1	259.0	202	2 892.0
7	内蒙古科尔沁	43°36'	122°20'	385.1	6.1	180.0	150	3 113.0
8	内蒙古甘旗卡	42°56'	122°20'	451.1	5.8	198.5	140	2 888.9
9	内蒙古东风	43°39'	121°40'	338.3	5.9	230.0	148	3 115.3
10	内蒙古巴林左旗	43°58'	119°22'	400.0	5.3	1 024.0	115	2 932.0
11	内蒙古乌丹	42°56'	119°01'	370.0	3.5	634.0	115	2 925.0
12	辽宁海城	40°52'	122°41'	721.3	10.4	19.0	160	2 543.0
13	辽宁王府	42°03'	121°30'	502.7	8.1	681.0	130	2 435.5
14	辽宁关山	42°08'	121°58'	500.0	7.2	103.0	167	2 534.6
15	辽宁富山	41°25'	119°36'	614.7	7.6	413.0	145	2 850.0
16	辽宁白山	41°45'	119°26'	390.0	7.5	1 150.0	128	2 963.0
17	辽宁黑山	41°16'	119°56'	376.0	6.2	1 369.0	128	2 963.0
18	河北张家口	40°49'	114°53'	365.0	9.0	712.0	120	3 661.2
19	陕西靖边	37°39'	108°49'	443.5	10.0	1 360.0	193	2 828.2
20	新疆石河子	44°18'	86°04'	225.0	8.1	450.8	169	2 818.0
21	北京房山	39°44'	116°08'	645.2	10.8	51.0	202	2 800.0
22	河南窑店	34°34'	111°12'	630.0	13.8	1 017.0	219	2 354.3
23	河南韩洼	34°39'	111°36'	630.0	13.8	627.0	216	2 217.6
24	山东安丘	36°26'	119°14'	646.3	12.2	273.0	115	2 502.1
25	山东诸城	35°59'	119°24'	741.8	13.2	65.0	217	2 402.9
26	山东临沂	35°06'	118°21'	849.0	13.4	86.5	200	1 956.6
27	山东东营	37°26'	118°40'	555.9	12.8	8.8	206	2 605.4

1.2 试验地概况

文冠果种源育苗试验位于山东省安丘市文冠果种植示范基地(36°26'38.36" N, 119°14'6.60" E), 属暖温带大陆性季风气候, 历年平均降水量 646.3 mm, 平均气温 12.2℃, 平均光照 2 502.1 h, 最大降水量 1 027.0 mm, 最低气温 -18.7℃, 最高气温 40.1℃。

2 研究方法

2.1 种子采集方法

采种方法参照野生植物种子采集技术规范^[12]。每个地理种源地选择 30 株天然成熟采种母树, 采种母树要求生长健壮、无病虫害, 且采种母树间直线距离大于 50 m。在每株母树的不同部位均匀采集种子等量混合, 自然风干, 每个种源共收集 2 kg 左右

种子作为种源试验材料^[13]。

2.2 种子性状测定

每个种源随机选取 30 粒种子, 使用游标卡尺分别测定文冠果种子的种子长、种子宽、种子厚、种皮厚, 使用天平测定种子的种子质量、种仁质量、种皮质量, 记录数据。测定时游标卡尺精确到 0.01 mm, 天平精确到 0.01 g。

2.3 苗期性状调查

2017 年 4 月在文冠果种源育苗试验地育苗, 按完全随机区组设计, 10 株双行小区, 20 次重复, 并进行标记, 统一管理。9 月对试验林进行生长调查, 每个种源随机挑选 6 组, 每组 10 株幼苗, 测量其苗高、地径。用标尺测量苗高, 精确到 0.1 cm, 用游标卡尺测量地径, 精确到 0.01 mm。苗木生长性状测量后,

每组选取1株苗高、地径与平均值相近的样本,收获整个植株,将其分为根、枝、叶,于105℃杀青15 min,80℃烘48 h至恒质量,称量各组分干质量。

2.4 统计及遗传分析

采用Excel和SPSS22.0软件对测试数据进行处理及方差分析、多重比较和相关分析。

文冠果不同种源性状的广义遗传力(H^2)按照续九如^[14]的方法计算。遗传变异系数(GCV)计算公式:

$$GCV = \sigma/X \times 100\%$$

式中: σ 为遗传标准差, X 为性状平均值^[15]。

不同种源的现实增益的计算公式:

现实增益 = (入选种源性状平均值 - 总平均值) / 总平均值 $\times 100\%$ ^[16]。

3 结果与分析

3.1 文冠果不同种源种子和苗期性状差异分析

对文冠果27个种源的种子形态性状进行统计分析,结果(表2)表明:文冠果种子各形态性状种源内变异较小,但种源间变异较大,说明27个种源间遗传分化显著,优良种源选择潜力较大;种源间变异系数最大的是种仁质量,为29.15%,种皮质量、种子质量和种皮厚变异系数分别为24.70%、24.52%和23.99%,均超过了20%。

对不同种源间文冠果种子的性状进行方差分析及多重比较,结果(表2)表明:不同种源间文冠果种子性状方差分析模型均极显著,说明27个种源间种子性状存在丰富的变异。5号内蒙古舍伯吐种源的种长最长,为15.64 mm,显著高于其他种源(除3、4、6、8、21、27号种源外);11号内蒙古乌丹种源的种皮最厚,为1.19 mm,27号山东东营种源的种皮最薄,为0.68 mm。

单粒种子质量和种仁质量是衡量各种源种子优劣和产量高低的重要指标^[17],其中,6号内蒙古图布信种源的种子质量和种仁质量最高,分别为1.22、0.64 g(表2),比平均值分别高25.77%和36.17%,其次为26号山东临沂种源,种子质量和种仁质量分别为1.14、0.58 g,分别比平均值高17.53%、23.40%。

文冠果苗期苗高、地径和生物量大小是衡量苗期生长优劣的重要指标。对苗期生长性状进行统计分析(表3),发现27个种源间文冠果苗期性状变异系数较大,枝干质量、叶干质量、苗高种源间

变异系数分别高达81.64%、69.99%和63.09%,说明文冠果苗期性状存在极丰富的遗传变异。不同种源1年生苗高、地径和生物量均差异极显著,其中,27号种源的苗高、地径最高,分别为91.80 cm和9.76 mm,分别比平均值高64.63%和28.59%,24号种源的苗高次之,为90.80 cm;26号、3号、14号种源的地径均较高,分别为9.10、9.30、9.61 mm,分别比平均值高19.89%、22.53%、26.62%;18号种源的苗高和地径值均最小,分别为22.12 cm、5.50 mm。

遗传力是树木生长性状的主要遗传参数^[14],对树木进行遗传改良之前,首先应该了解其遗传特性,以便制定相应的育种策略。文冠果27个种源种子和苗期性状的遗传参数(表2、3)表明:种子各形态性状、苗高和地径的遗传力均达0.9以上,说明文冠果种子和苗期生长性状在种源水平上受较高水平的遗传力控制,遗传改良的空间比较大,可作为变异研究的主要性状。

3.2 文冠果不同种源种子和苗期性状与地理气候因子的相关性分析

种子及其幼苗的生长性状表现不仅与树种本身的遗传特性相关,同时与种源地的地理气候因子有很大关系,不同的树种有其自身的地理种源变异规律^[18]。文冠果不同种源种子和苗期性状与地理气候因子的相关关系(表4)表明:苗期的苗高与种源地降水、年均气温及地径与降水之间呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别为0.570、0.529和0.491,表明随着种源地降水升高,苗期的苗高和地径有上升的趋势,随着种源地年均气温的升高,苗高也随之显著提高;相反,苗期苗高与种源地纬度、年均日照及地径与年均日照,呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数分别为-0.495、-0.574和-0.521,表明种源地纬度越高,苗高越小,年均日照越长,苗高、地径越小,长势越差。除此之外,苗期地径与年均气温、枝干质量与降水量、枝干质量与年均气温均呈显著相关($P < 0.05$),相关系数分别为0.426、0.386和0.427。

种子表型性状中,种子质量与海拔呈显著负相关($P < 0.05$),相关系数为-0.484;种子长、种子宽、种皮质量均与海拔均呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数分别为-0.519、-0.487、-0.602;经度和无霜期与各种源种子和苗期性状相关不显著。

表2 不同种源文冠果种子形态指标
Table 2 Morphological traits of seeds from different provenances of *X. sorbifolium*

种源号 Provenance number	种子质量/g Seed weight	种子长/mm Seed length	种子宽/mm Seed width	种子厚/mm Seed thickness	种皮厚/mm Seedcoat thickness	种皮质量/mm Seed coatweight	种仁质量/mm kernel weight
1	1.09 ± 0.03a	13.75 ± 0.17de	10.77 ± 0.15c	14.68 ± 0.19a	0.99 ± 0.03b	0.54 ± 0.01a	0.55 ± 0.02a
2	0.92 ± 0.05c	14.11 ± 0.34cd	12.82 ± 0.28b	10.56 ± 0.22e	0.97 ± 0.04b	0.47 ± 0.03b	0.45 ± 0.02c
3	1.00 ± 0.03b	14.67 ± 0.23ab	13.32 ± 0.17a	10.71 ± 0.19e	0.77 ± 0.03g	0.53 ± 0.02a	0.47 ± 0.01bc
4	1.09 ± 0.03a	15.36 ± 0.26a	13.73 ± 0.13a	11.41 ± 0.18e	1.05 ± 0.04ab	0.57 ± 0.02a	0.52 ± 0.02b
5	1.10 ± 0.03a	15.64 ± 0.30a	13.83 ± 0.14a	11.14 ± 0.16e	0.79 ± 0.03fg	0.58 ± 0.02a	0.52 ± 0.01b
6	1.22 ± 0.05a	14.90 ± 0.34a	11.06 ± 0.28c	15.39 ± 0.29a	0.97 ± 0.03b	0.58 ± 0.02a	0.64 ± 0.04a
7	0.76 ± 0.04i	12.41 ± 0.27j	9.74 ± 0.19de	13.33 ± 0.32cd	1.00 ± 0.05b	0.42 ± 0.02g	0.35 ± 0.02fg
8	0.96 ± 0.03b	14.91 ± 0.28a	13.39 ± 0.19a	10.77 ± 0.14e	0.76 ± 0.02gh	0.51 ± 0.02a	0.45 ± 0.02c
9	1.03 ± 0.03a	13.31 ± 0.21f	10.48 ± 0.19c	14.59 ± 0.21a	0.96 ± 0.04b	0.51 ± 0.02a	0.51 ± 0.02b
10	0.95 ± 0.04bc	13.05 ± 0.22g	10.72 ± 0.21c	13.63 ± 0.26bc	0.88 ± 0.03d	0.46 ± 0.01cd	0.49 ± 0.03b
11	0.79 ± 0.03h	12.50 ± 0.24ij	10.07 ± 0.18c	12.83 ± 0.31d	1.19 ± 0.04a	0.42 ± 0.02fg	0.37 ± 0.02ef
12	1.02 ± 0.04ab	13.26 ± 0.19fg	11.10 ± 0.19c	14.03 ± 0.26b	0.89 ± 0.03cd	0.50 ± 0.02ab	0.52 ± 0.02b
13	0.89 ± 0.03e	12.71 ± 0.18h	10.55 ± 0.17c	13.82 ± 0.21b	0.90 ± 0.03bc	0.47 ± 0.02b	0.42 ± 0.02d
14	0.76 ± 0.02i	12.88 ± 0.13gh	10.32 ± 0.13c	14.59 ± 0.25a	1.02 ± 0.04b	0.47 ± 0.01bc	0.29 ± 0.01g
15	0.99 ± 0.04b	14.40 ± 0.28bc	12.95 ± 0.21ab	10.85 ± 0.18e	0.82 ± 0.04ef	0.52 ± 0.02a	0.47 ± 0.02c
16	0.90 ± 0.03de	12.84 ± 0.19h	10.26 ± 0.17c	13.73 ± 0.24b	1.07 ± 0.04a	0.46 ± 0.01c	0.43 ± 0.02cd
17	0.79 ± 0.05hi	12.41 ± 0.27j	9.56 ± 0.23e	13.03 ± 0.31d	1.00 ± 0.04b	0.41 ± 0.02g	0.38 ± 0.03e
18	0.84 ± 0.04gh	12.84 ± 0.58h	10.14 ± 0.46cd	13.14 ± 0.58d	0.87 ± 0.05d	0.43 ± 0.02ef	0.40 ± 0.02de
19	0.88 ± 0.03ef	12.79 ± 0.19h	10.06 ± 0.15cd	13.95 ± 0.26b	1.09 ± 0.04a	0.47 ± 0.02c	0.42 ± 0.02d
20	1.03 ± 0.04a	13.62 ± 0.25ef	10.82 ± 0.21c	14.42 ± 0.18a	0.86 ± 0.03de	0.49 ± 0.02b	0.54 ± 0.02ab
21	1.07 ± 0.06a	14.80 ± 0.29a	13.38 ± 0.31a	11.29 ± 0.23e	0.72 ± 0.03hi	0.56 ± 0.03a	0.51 ± 0.03b
22	0.93 ± 0.03c	12.91 ± 0.21g	10.42 ± 0.19c	13.74 ± 0.24b	0.97 ± 0.03b	0.46 ± 0.01c	0.47 ± 0.02c
23	0.87 ± 0.03fg	12.37 ± 0.19j	10.29 ± 0.16c	13.91 ± 0.25b	0.95 ± 0.03b	0.45 ± 0.02de	0.42 ± 0.02d
24	1.09 ± 0.04a	13.66 ± 0.19ef	11.08 ± 0.19c	14.40 ± 0.26ab	0.88 ± 0.03d	0.54 ± 0.02a	0.54 ± 0.02a
25	0.91 ± 0.04cd	12.63 ± 0.18hi	10.44 ± 0.22c	13.74 ± 0.25b	0.98 ± 0.04b	0.47 ± 0.02b	0.44 ± 0.02c
26	1.14 ± 0.03a	13.86 ± 0.17d	11.12 ± 0.18c	15.28 ± 0.25a	0.90 ± 0.03b	0.55 ± 0.02a	0.58 ± 0.02a
27	1.11 ± 0.06a	15.16 ± 0.31a	13.74 ± 0.26a	11.29 ± 0.24e	0.68 ± 0.03i	0.61 ± 0.04a	0.50 ± 0.03b
平均值 Average	0.97	13.62	11.34	13.12	0.92	0.50	0.47
相对极差 Relatively range	1.59	0.70	0.88	0.88	1.50	1.78	2.35
标准差 Standard deviation	0.24	1.64	1.76	1.97	0.22	0.12	0.14
标准误 Standard error	0.01	0.06	0.06	0.07	0.01	0.00	0.00
变异系数 (种源内)/% Variation coefficients (within provenances)	21.32	10.09	10.27	10.59	20.52	22.07	24.65
变异系数 (种源间)/% Variation coefficients (among provenances)	24.52	12.01	15.56	15.00	23.99	24.70	29.15
F值 F value	10.63 **	18.40 **	50.82 **	41.59 **	11.51 **	7.34 **	12.58 **
遗传力 Heritability	0.91	0.95	0.98	0.98	0.91	0.86	0.92

注:表中同一列不同小写字母代表显著差异。* *表示0.01水平上差异显著。

Note: The different lower-case letters in the same column mean significant differences. * * Indicates significant difference at 0.01 level.

3.3 速生种源初选

优良种源初选采用刘勇的苗木质量评价方法^[19],结合性状表现和现实增益进行综合评定。以

苗期最重要的2个生长量指标,也是苗木形态评价中最常用的2个指标—苗高和地径为依据^[20-24],对种源进行初步选择。苗高和地径排名前10位的种

表3 文冠果各种源苗期性状

Table 3 Morphological traits of growth from different provenances of *X. sorbifolium*

种源号 Provenance number	苗高/cm Seedling height	地径/mm Ground diameter	枝干质量/g Limb dry weight	叶干质量/g Leaf dry weight	根干质量/g Root dry weight
1	41.23 ± 2.98ij	7.40 ± 0.25de	8.05 ± 1.47c	7.32 ± 1.19b	12.80 ± 1.21a
2	43.26 ± 4.12gh	6.85 ± 0.32fg	8.67 ± 2.53c	9.99 ± 2.78b	9.89 ± 1.49ab
3	70.86 ± 4.81b	9.30 ± 0.33a	24.63 ± 4.04ab	24.08 ± 3.07a	20.02 ± 1.82a
4	46.77 ± 4.02g	6.96 ± 0.28f	8.48 ± 2.52c	7.88 ± 2.73b	8.71 ± 1.96b
5	44.90 ± 3.83g	6.55 ± 0.24h	9.92 ± 3.43c	11.87 ± 3.35b	11.28 ± 2.95a
6	42.51 ± 3.47hi	6.25 ± 0.26hi	5.32 ± 1.37c	5.56 ± 1.28c	7.26 ± 0.70b
7	37.73 ± 2.73j	5.54 ± 0.17j	3.39 ± 0.46d	3.53 ± 0.66c	6.31 ± 0.24b
8	45.53 ± 3.77g	7.08 ± 0.32ef	6.32 ± 0.70c	9.10 ± 1.11b	7.63 ± 1.44b
9	51.43 ± 3.61ef	6.79 ± 0.27gh	7.38 ± 1.38c	7.89 ± 1.40b	6.97 ± 1.18b
10	41.28 ± 3.73i	6.65 ± 0.26h	6.97 ± 1.76c	7.80 ± 1.30b	8.94 ± 1.47ab
11	37.97 ± 2.88j	5.90 ± 0.27ij	4.09 ± 1.15c	5.17 ± 1.61c	6.02 ± 1.51b
12	68.30 ± 4.54b	8.46 ± 0.37a	13.88 ± 4.31b	10.30 ± 2.52b	11.53 ± 1.40a
13	59.67 ± 3.67d	7.42 ± 0.30d	8.25 ± 1.51c	7.87 ± 1.33b	10.96 ± 1.51ab
14	79.70 ± 5.11ab	9.61 ± 0.39a	17.97 ± 1.80b	13.10 ± 2.54b	13.80 ± 2.02a
15	61.93 ± 5.06c	8.22 ± 0.41bc	9.32 ± 2.39c	6.22 ± 1.78bc	12.36 ± 2.35a
16	66.00 ± 4.49b	8.27 ± 0.36b	9.74 ± 2.39c	6.85 ± 1.27b	11.80 ± 2.96a
17	58.08 ± 4.66d	8.22 ± 0.32b	14.82 ± 2.13b	11.06 ± 1.43b	12.99 ± 1.59a
18	22.12 ± 2.92k	5.50 ± 0.32j	3.85 ± 2.29cd	4.80 ± 2.39c	7.83 ± 2.94b
19	42.30 ± 3.46i	6.73 ± 0.26h	6.12 ± 2.23c	8.32 ± 3.09b	7.05 ± 1.65b
20	49.75 ± 4.57fg	8.52 ± 0.42a	9.19 ± 2.65c	11.04 ± 2.37b	12.00 ± 2.98a
21	56.02 ± 4.53de	8.41 ± 0.39ab	19.07 ± 7.48b	15.06 ± 4.81b	16.12 ± 3.47a
22	50.05 ± 3.81f	7.41 ± 0.28d	12.55 ± 3.62bc	9.42 ± 3.34b	16.46 ± 6.41a
23	65.67 ± 5.02bc	7.64 ± 0.40d	11.34 ± 2.52c	8.86 ± 1.46b	6.57 ± 1.17b
24	90.80 ± 4.27a	8.76 ± 0.29a	15.08 ± 3.59b	14.02 ± 2.06b	13.09 ± 2.05a
25	61.52 ± 3.36cd	7.75 ± 0.28cd	11.00 ± 1.40c	7.08 ± 1.89b	8.24 ± 1.04b
26	78.10 ± 4.21ab	9.10 ± 0.32a	13.31 ± 1.87b	9.83 ± 1.39b	8.02 ± 0.84b
27	91.80 ± 3.97a	9.76 ± 0.31a	29.95 ± 5.75a	18.28 ± 3.65ab	16.24 ± 1.46a
平均值 Average	55.76	7.59	11.06	9.71	10.77
相对极差 Relatively range	2.94	2.34	4.65	3.48	4.28
标准差 Standard deviation	35.18	2.70	9.03	6.80	6.19
标准误 Standard error	0.87	0.07	0.71	0.53	0.49
变异系数(种源内)/% Variation coefficients (within provenances)	7.40	4.05	24.60	23.04	18.03
变异系数(种源间)/% Variation coefficients (among provenances)	63.09	35.55	81.64	69.99	57.44
F值 F value	17.35 **	14.08 **	4.43 **	3.47 **	2.65 **
遗传力 Heritability	0.94	0.93	0.77	0.71	0.62

注:表格同一列不同小写字母代表显著差异。* *表示0.01水平上差异显著。

Note: The different lower-case letters in the same column mean significant differences. * * Indicates significant difference at 0.01 level.

源(表5)表明:27号山东东营、24号山东安丘、14号辽宁关山、26号山东临沂、3号内蒙古库伦、12号辽宁海城和16号辽宁白山7个种源的苗高和地径在27个种源中排名均比较靠前,呈现出良好的速生性。

同时计算苗高、地径、枝干质量、叶干质量和根干质量5个性状的现实增益(表6),根据刘勇的苗

木质量评价方法^[19],以苗高现实增益的20%和地径现实增益的10%为临界值,同时枝干质量、叶干质量和根干质量现实增益大于0为文冠果速生种源筛选条件,筛选出24号山东安丘、27号山东东营、3号内蒙古库伦、14号辽宁关山和12号辽宁海城5个种源为速生种源(表5)。

表4 文冠果表型性状与地理-气候因子相关系数

Table 4 Correlation coefficients between morphological traits of *X. sorbifolium* and geographical-meteorological factors

项目 Item	纬度 NLatitude	经度 E Longitude	降水量 Annual precipitation	年均气温 Annual temperature	海拔 altitude	无霜期 frost-free period	年均日照 Annual average sunshine
苗高 Seedling height	-0.495 **	0.066	0.570 **	0.529 **	-0.295	0.230	-0.574 **
地径 Ground diameter	-0.363	-0.105	0.491 **	0.426 *	-0.240	0.210	-0.521 **
枝干质量 Limb dry weight	-0.360	0.034	0.386 *	0.427 *	-0.277	0.313	-0.319
叶干质量 Leaf dry weight	-0.165	-0.046	0.160	0.232	-0.235	0.193	-0.162
根干质量 Root dry weight	-0.107	-0.014	0.192	0.178	-0.070	0.067	-0.159
种子质量 Seed weight	0.034	0.059	0.142	0.189	-0.484 *	0.254	-0.252
种子长 Seed length	0.272	0.166	-0.092	-0.081	-0.519 **	0.181	0.068
种子宽 Seed width	0.173	0.169	0.027	-0.026	-0.487 **	0.160	0.059
种子厚 Seed thickness	-0.195	-0.152	0.130	0.202	0.122	0.048	-0.365
种皮厚 Seed coat thickness	0.077	0.049	-0.208	-0.275	0.434	-0.220	0.004
种皮质量 Seed coat weight	0.032	0.176	0.167	0.186	-0.602 **	0.305	-0.240
种仁质量 kernel weight	0.031	-0.034	0.108	0.171	-0.348	0.190	-0.235

注: * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

Note: * Indicates significant difference at 0.05 level. ** Indicates significant difference at 0.01 level.

表5 文冠果优良种源苗高地径排序

Table 5 Seedling height and ground diameter rank of *X. sorbifolium* provenances

排名 Rank	种源编号 Provenance number	种源 Provenance	苗高/cm Seedling height	排名 Rank	种源编号 Provenance number	种源 Provenance	地径/mm Ground diameter
1	27	山东东营	91.80	1	27	山东东营	9.76
2	24	山东安丘	90.80	2	14	辽宁关山	9.61
3	14	辽宁关山	79.70	3	3	内蒙古库伦	9.30
4	26	山东临沂	78.10	4	26	山东临沂	9.10
5	3	内蒙古库伦	70.86	5	24	山东安丘	8.76
6	12	辽宁海城	68.30	6	20	新疆石河子	8.52
7	16	辽宁白山	66.00	7	12	辽宁海城	8.46
8	23	河南韩洼	65.67	8	21	北京房山	8.41
9	15	辽宁富山	61.93	9	16	辽宁白山	8.27
10	25	山东诸城	61.52	10	17	辽宁黑山	8.22

这些种源苗高、地径、枝干质量、叶干质量和根干质量的现实增益分别为 22.48%~64.63%、11.36%~28.49%、25.52%~170.77%、6.03%~147.86%和 7.00%~85.82%，高于 27 个种源的整体表现，说明初选优良种源基本是比较合理的，可以作为安丘地区文冠果优良种源的筛选和种子调拨的依据。

4 讨论

一般来说,分布范围较广的树种会产生与其生境相适应的遗传变异,并将这种变异通过相对稳定的性状(果实、种子等)传给下一代^[18],这对其生存和进化是有利的^[25]。文冠果分布广泛且各分布区环境条件复杂,再加上长期的地理隔离和自然选择,

不同种源文冠果在某些性状上必然会存在一定的变异。本研究中,27 个文冠果种源间各性状均差异极显著,可见,其种源间表型性状变异较大,这可能是文冠果对不同生存环境所采取的适应性策略,这种现象与石蒜(*Lycoris radiata* Herb)、伯尔硬胡桃(*Sclerocaryabirrea* Rich)、雷公藤(*Tripterygium wilfordii* Hook)和猴面包树(*Adansonia digitata* Linn.)等变异情况^[26-29]比较类似。文冠果苗期性状和种子形态性状变异系数结果表明,各表型性状在种源间的变异模式表现为枝干质量>叶干质量>苗高>根干质量>地径,种子种仁质量>种皮质量>种子质量>种皮厚>种子宽>种子厚>种子长,说明文冠果苗期的地上部分生物量和种子的质量性状对不同生境反映更敏感,更容易发生变异。

表6 文冠果各种源苗期性状现实增益

Table 6 Realized Genetic Gains of *X. sorbifolium*

%

种源编号 Provenance number	种源 Provenance	苗高 Seedling height.	地径 Ground diameter	枝干质量 Limb dry weight	叶干质量 Leaf dry weight	根干质量 Root dry weight	速生种源 Fast-growing Provenance
1	黑龙江牡丹江	-26.06	-2.61	-27.23	-24.61	18.82	
2	内蒙古奈曼	-22.42	-9.87	-21.65	2.84	-8.24	
3	内蒙古库伦	27.07	22.49	122.67	147.86	85.82	√
4	内蒙古扎鲁特	-16.13	-8.30	-23.29	-18.90	-19.13	
5	内蒙古舍伯吐	-19.48	-13.76	-10.33	22.18	4.71	
6	内蒙古图布信	-23.21	-17.39	-51.94	-42.73	-32.60	
7	内蒙古科尔沁	-32.34	-27.06	-69.39	-63.64	-41.41	
8	内蒙古甘旗卡	-18.35	-6.80	-42.89	-6.34	-29.17	
9	内蒙古东风	-7.77	-10.64	-33.30	-18.79	-35.28	
10	内蒙古巴林左旗	-25.97	-12.47	-36.96	-19.67	-16.98	
11	内蒙古乌丹	-31.91	-22.30	-63.05	-46.83	-44.15	
12	辽宁海城	22.48	11.36	25.52	6.03	7.00	√
13	辽宁王府	7.01	-2.27	-25.40	-18.97	1.71	
14	辽宁关山	42.93	26.53	62.44	34.86	28.12	√
15	辽宁富山	11.06	8.22	-15.76	-36.00	14.71	
16	辽宁白山	18.36	8.87	-11.96	-29.48	9.53	
17	辽宁黑山	4.16	8.24	34.03	13.86	20.56	
18	河北张家口	-60.33	-27.58	-65.17	-50.57	-27.30	
19	陕西靖边	-24.14	-11.41	-44.71	-14.32	-34.58	
20	新疆石河子	-10.78	12.16	-16.93	13.60	11.35	
21	北京房山	0.46	10.76	72.44	54.98	49.61	
22	河南窑店	-10.24	-2.41	13.45	-3.06	52.75	
23	河南韩洼	17.77	0.60	2.51	-8.81	-39.06	
24	山东安丘	62.83	15.38	36.35	44.33	21.55	√
25	山东诸城	10.32	1.99	-0.52	-27.17	-23.55	
26	山东临沂	40.06	19.79	20.33	1.21	-25.57	
27	山东东营	64.63	28.49	170.77	88.15	50.76	√

文冠果种子表型性状变异受其本身的遗传和所处生境的影响^[18],从文冠果表型性状与其种源所在地的地理气候因子相关分析发现,不同种源文冠果苗期生长性状的地理变异受降水量、年均气温、年均日照和纬度控制,受降水量、年均气温和年均日照控制为主。总体表现为,在文冠果分布区内,种源地降水越多、年均气温越高、年均日照越少,苗期长势越好的趋势;而不同种源的种子质量、种子长、种子宽、种皮质量主要受种源地海拔影响,表现为海拔越高,种子越小,种皮越薄。在其它树种的地理变异中也曾发现过这种现象,林玮等^[5]发现,任豆(*Zeniainsignis* Chun)种子厚度和纬度呈负相关,种子长宽比与海拔呈负相关,但与年平均降水量呈正相关;何霞等^[6]发现,苦楝(*Meliaazedarach* Linn)气温较高、降水丰富、气压低、平均最低气温高、日照丰富地区的种源苗期生长快,生物量大。高张莹等^[18]发现,核桃楸(*Juglansmandshurica* Maxim)果核形态变异主要受纬度、温度和相对湿度的影响。所以,在考虑文冠

果种源区划和引种时不能只考虑种源地的经纬度及当地的年均气温、降水、海拔和年均日照也应该加以考虑。

本研究在对山东安丘地区速生种源进行初选时,选用的主要是苗高、地径和生物量指标。根据形态差异对文冠果优良种源进行选择,仅仅是一个初步选择的过程。在进行速生种源选择时,除上述指标外,茎根比、一级侧根数、须根数等形态指标,矿质营养、苗木水分、光合作用等生理指标以及抗性表现也应加以考虑,还要通过长期观测,同时增加分子遗传证据,进一步筛选,确定适生的最优种源。

5 结论

文冠果分布范围较广,地理变异较丰富,开展种源实验,可以了解其地理种源变异规律,并进行优良种源选择及区划,为其遗传多样性评价和遗传改良提供依据,同时对林业生产具有重要意义。本研究揭示:随地理气候因子的变化,文冠果 27 个种源的

苗期性状和种子形态性状在种源间形成了明显的变异,且这种变异是稳定遗传的;文冠果苗期性状变异主要受降水量、年均气温、年均日照3个环境主导因子的影响,其中,地上部分生物量变异最容易受环境影响;种子性状变异主要受海拔的影响,而种子大小和种皮质量对环境的反应最敏感。初步选定山东安丘、山东东营、内蒙古库伦、辽宁关山和辽宁海城5个种源为适合安丘地区育苗的优良种源。

参考文献:

- [1] 万群芳,何景峰,张文辉. 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):179-185.
- [2] 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.
- [3] 于海燕,陈梦园,范思琪,等. 苗木不同繁育方式对文冠果苗木生长的影响[J]. 林业资源管理,2017(2):139-142.
- [4] 张翠琴,姬志峰,林丽丽,等. 五角枫种群表型多样性[J]. 生态学报,2015,35(16):5343-5352.
- [5] 林 玮,周 鹏,周祥斌,等. 任豆种源种子性状地理变异研究[J]. 华南农业大学学报,2016,37(4):69-74.
- [6] 何 霞,廖柏勇,王 芳,等. 苦楝种源幼林期生长性状地理变异的研究[J]. 华南农业大学学报,2016,37(4):75-81.
- [7] 刘 霞,孙 冲,有详亮,等. 文冠果苗期种源试验[J]. 西南林业大学学报,2013,33(6):51-55.
- [8] 马 新,姜继元,朱耀军,等. 19个文冠果种源在新疆的性状表现与聚类分析[J]. 贵州农业科学,2016,44(11):121-124.
- [9] 王 超,王冬梅,李永红,等. 能源树种文冠果在黄土残垣沟壑区引种试验的初步研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(3):90-96.
- [10] 张芸香,刘晶晶,郭晋平,等. 山西省文冠果种子形态特征及地理种源差异性研究[J]. 中国农学通报,2015,31(22):39-45.
- [11] 王 涛. 中国能源植物文冠果的研究[M]. 北京:中国科学技术出版社,2012.
- [12] 蔡 杰,张 挺,刘 成,等. 野生植物种子采集技术规范[J]. 植物分类与资源学报,2013,35(3):221-233.
- [13] 王 涛,王利兵,于海燕. 中国能源植物山杏的研究[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [14] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [15] 赵兴堂,夏德安,曾凡锁,等. 水曲柳生长性状种源与地点互作及优良种源选择[J]. 林业科学,2015,51(3):140-147.
- [16] 陈 跃,周志春,吴吉富,等. 马尾松优良种植材料现实遗传增益验证[J]. 林业科学研究,2003,16(2):203-208.
- [17] 刘凤玲,黄春球,文 彬,等. 假鹊肾树种子形态及萌发特性[J]. 种子,2018,4(1):45-48.
- [18] 高张莹,张海峰,陈国平,等. 核桃楸种群果核形态及地理变异[J]. 应用与环境生物学报,2017,23(4):609-615.
- [19] 刘 勇. 苗木质量调控理论与技术[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [20] Jacobs D F, Salifu K F, Seifert J R. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings[J]. New Forests, 2005, 30(2-3):235-251.
- [21] 胡鹏飞,蔡光辉,张佳男,等. 川滇无患子不同种源子代幼树生长的初步评价[J]. 现代园艺,2018(11):3-7.
- [22] 何 霞,吕子豪,廖柏勇,等. 苦楝不同种源在广东生长适应性表现及早期选择[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(3):44-50.
- [23] 李国雷,刘 勇,祝 燕,等. 国外苗木质量研究进展[J]. 世界林业研究,2011,24(2):27-35.
- [24] 王 艺,张 蕊,冯建国,等. 不同种源南方红豆杉生长差异分析及早期速生优良种源筛选[J]. 植物资源与环境学报,2012,21(4):41-47.
- [25] 岳华峰,邵文豪,井振华,等. 苦楝种子形态性状的地理变异分析[J]. 林业科学研究,2010,23(3):453-456.
- [26] Munthali C R Y, Chirwa P W, Akinnifesi F K. Phenotypic variation in fruit and seed morphology of *Adansonia digitata* L. (baobab) in five selected wild populations in Malawi[J]. Agroforestry Systems, 2012, 85(2):279-290.
- [27] Gouwakinnou G N, Assogbadjo A E, Lykke A M, et al. Phenotypic variations in fruits and selection potential in *Sclerocarya birrea* subsp. *birrea* [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(4):777-783.
- [28] 杨志玲,杨 旭,谭梓峰,等. 不同野生居群石蒜表型变异及物候期差异[J]. 应用与环境生物学报,2010,16(3):369-375.
- [29] 龙 凤,余传琼,吴承祯,等. 不同种源雷公藤叶物候特征比较[J]. 应用与环境生物学报,2016(4):660-666.

Geographic Variation of Seed and Seedling Growing Traits in *Xanthoceras sorbifolium*

ZHAO Yang, BI Quan-xin, JU Jiao, YU Dan, FAN Si-qi, CHEN Meng-yuan,
CUI Yi-fan, FU Guang-hui, WANG Li-bing

(Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute
of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [**Objective**] To provide a basis for introduction to appropriate regions and to further improve the genetic traits of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge, the seed morphology from various provenances and seedling growing traits in Shandong were studied. [**Method**] The morphological parameters, including seed length, seed width, seed thickness and seed weight, were measured and provenance test was conducted in Anqiu of Shandong Province with the seeds of 27 *X. sorbifolium* provenances collected from the provinces of Shandong, He'nan, Liaoning, Inner Mongolia, etc. ANOVA analysis, correlation analysis, and cluster analysis were conducted with different traits. [**Result**] The phenotypic traits among provenances were significantly different ($P < 0.01$), and their heritability were higher than 0.9, which indicated abundant variation of morphological traits subjected to strong genetic control. Correlation analysis showed that the seedling height had most positive correlation to precipitation and annual temperature, and the base diameter had most positively correlation to precipitation. The seedling height showed extremely significant negative correlation with latitude and sunshine hours. The base diameter showed extremely significant negative correlation with sunshine hours, too. Highly significant negative correlation between seed size and altitude was also found. [**Conclusion**] There was obvious variation of the seedling and seed morphological characters among the 27 *X. sobifolium* provenances, and they can be stably inherited. The variation of the seedling growing traits is mainly influenced by precipitation, sunshine and annual temperature while the variation of seed traits is mainly influenced by altitude, the variation of biomass of aerial part is the most susceptible to the environment. The correlation and cluster analysis indicate that the phenotypic traits variation are in accordance with the geographic distance and clustering. Five fast-growing provenances and seven high-yielding provenances are selected for experiments and popularization.

Keywords: *Xanthoceras sorbifolium* Bunge; seed morphology; geographic variation; provenance tests

(责任编辑:徐玉秀)