

文章编号:1001-1498(2016)05-0784-09

苦楝种源果核和种子性状地理变异的趋势面分析

廖柏勇^{1,2}, 陈丽君^{1,2}, 王芳^{1,2}, 何霞^{1,2}, 刘明骞^{1,2}, 陈涵斌^{1,2}, 任颖^{1,2}, 陈晓阳^{1,2*}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室, 广东广州 510642)

关键词: 苦楝; 种源; 地理变异模式; 趋势面分析; 聚类分析。

中图分类号: S792.33

文献标识码: A

Trend Surface Analysis of Provenance Geographic Variation of *Melia azedarach* Stone and Seed

LIAO Bo-yong^{1,2}, CHEN Li-jun^{1,2}, WANG Fang^{1,2}, HE Xia^{1,2}, LIU Ming-qian^{1,2},
CHEN Han-bing^{1,2}, REN Ying^{1,2}, CHEN Xiao-yang^{1,2}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China;

2. Provincial Key Laboratory of Forest Plant Germplasm Innovation and Utilization, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] *Melia azedarach* is a multi-purpose fast growing timber tree species widely distributed in China. It is important to study the geographic variation pattern for seedlots and adaptive regions selection. [Method] 12 key traits of stone and seeds of 70 *M. azedarach* provenances collected from 17 provinces were used to analyze the geographic variation patterns by trend surface method. [Result] The results reveal that the traits variation of stones and seeds from different provenance are controlled by both longitude and latitude, but mainly the latitude variation. The performance within the distribution area in China totally follows a continuity of cline pattern. Among the traits observed, the width of stone and seeds shows a southwest-northeast gradient variation while hundred grain weight of stone and seeds mainly presents a northwest-southeast gradient variation. And peel 2 of stone shows a trend of south-north gradient variation. A positive linear relationship or a reverse parabolic curve relationship was found between traits and seedlots elevation, the width and weight of seeds and stones increased by the seedlot elevations. Based on the stone and seed traits, the cluster analysis and principal component analysis, the provenances can be divided into four groups. [Conclusion] Morphological differences of *Melia Azedarach* provenance shows that along with the change of the geographical factors, a variety of provenance forms their own ecological traits. Under similar geographical environment, the provenance traits performs similar trend. Increasing the molecular genetic evidence and long-term multi-location provenance trial could validate the reliability of the provenance regionalization.

Keywords: *Melia azedarach*; provenance; geographic variation model; trend surface analysis; cluster analysis

苦楝 (*Melia azedarach* L.) 为楝科 (Meliaceae) 楝属 (*Melia* L.) 植物, 俗称楝树、紫花树等, 是速生、优质的多用途用材树种。我国苦楝资源丰富, 分布广

泛, 从北方的河北保定、山西运城和甘肃陇南到南方的海南崖县, 从东部的台湾、福建沿海到西部的四川和云南, 分布范围覆盖中国陆地的三分之一^[1], 集中

收稿日期: 2016-01-27

基金项目: 广东省林业科技创新项目“楝科、樟科优质速生树种良种选育和高效栽培技术研究与示范”(2011KJCX002)

作者简介: 廖柏勇, 男, 博士。研究方向: 林木遗传育种。E-mail: liaoby05@126.com

* 通讯作者: 陈晓阳, 教授, 博士生导师。研究方向: 林木遗传育种与生物技术。E-mail: xychen@scau.edu.cn

于我国 18~38°N, 100~122°E。在海拔 2 100 m 以下的常绿阔叶林、落叶林及溪谷、田地的边缘和道路两旁都能见到苦楝。苦楝也广泛分布于斯里兰卡、泰国、越南、土耳其、菲律宾、不丹、尼泊尔、巴布亚新几内亚、印度、印度尼西亚、老挝、澳大利亚和太平洋群岛等热带和亚热带地区^[2]。

一个树种不同种源的表型性状与采种点经、纬度等地理自然因素的关系往往是非线性关系,可采用多元回归拟合曲面方程揭示各性状的变异趋势^[3]。徐化成等^[4]在 1981 年对 3 个地理因素利用逐步多元回归分析得出 50 年高生长与经纬度的回归方程,结合气候因子分析和主分量分析,将油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.) 全分布区划分为 10 个种源区。陈伯望等^[3]1995 年对全国杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 种源试验的 55 个试点的 43 个共同种源进行经纬度趋势面分析,得出 3 个杉木高产种源中心区。陈晓阳等^[5-7]对侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco) 的不同种源进行地理变异分析,分别在不同试验点对侧柏的越冬枯死率、1 年生苗高、苗高/主根长、总根长等性状进行了 1~4 次趋势面分析,得出了不同性状在种源间的地理变异规律。Ying 等^[8]对 5 个试验点 58 个种源的扭叶松(*Pinus contorta* Douglas Ex Loudon) 进行地理变异规律研究,采用多项式回归对生长性状、保存率等与经、纬度和海拔进行趋势面分析,得出扭叶松在不列颠哥伦比亚省西南部的优势种源;2006 年又根据趋势分析,开展了种子调拨研究,制定了不列颠哥伦比亚省扭叶松种子调拨指导方案^[9]。梁一池等^[10]对福建南平 2 年生侧柏种源试验进行经纬度地理变异趋势面分析。李纪元等^[11]对浙江吉安 1 年生 55 个种源的枫杨(*Pterocarya stenoptera* C. DC) 进行经纬度地理变异趋势面分析,得出 2 个生长优势区。陈存及等^[12]对福建省 2 个试验点 16 个种源 5 年生的毛竹(*Phyllostachys heterocyclus* (Carr.) Mitford cv. Pubescens) 生长性状进行经纬度地理趋势面分析。叶志宏等^[13]对福建洋口林场的 81 个种源开展 2 年生试验林分析,得出杉木种源变异的优势区。以上说明,多项式趋势面分析在地理变异规律研究中有重要的指导作用,对于种源区划和种子调拨有指导作用。

果实和种子是植物重要的繁殖器官,其表型性状形态学结构特征也是植物遗传多样性研究形态学标记的重要内容。苦楝分布广泛,种源之间在表型

性状上可能存在较大的遗传变异^[14-16]。有关苦楝地理变异的研究已有部分报道^[1,17-21],本研究利用趋势面分析技术,在经度、纬度和海拔 3 个地理因子方面,对分布区 70 个苦楝种源作果核和种子性状地理变异模式研究,旨在更清晰地描述苦楝果核和种子性状的地理变异趋势,为苦楝种源类群划分和种子区划提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

根据有关苦楝分布文献资料,了解苦楝国内分布范围,再采取网格法,结合物候区划布置采种点,使采种点分布均匀,有代表性。采种林分为本土起源的,采种母树达到正常的开花结实年龄,生长正常,无明显病虫害。每个采种点的采种母树不少于 30 株,母树间距大于 100 m。2011—2013 年从 17 个省份 70 个县(市)采集苦楝种子,各参试种源采种点地理信息见表 1。

1.2 试验观测方法

每个种源取 30 株母树的果核和种子进行测量,每株母树随机抽取中等大小的 30 粒果核、30 粒种子,用游标卡尺测量果核长、果核宽 1(果核最宽处)、果核宽 2(与果核宽 1 垂直方向宽度)、种子长、种子宽 1(种子最宽)、种子宽 2(与种子宽 1 垂直方向宽度)、果核皮厚 1(果核皮凸起处)、果核皮厚 2(果核皮凹陷处)。百粒质量测定方法为:每个种源分 4 个组,每组随机抽取果核和种子 100 粒,用电子天平进行果核百粒质量、种子百粒质量测量,精确到 0.01 g。果核性状、种子和果核皮厚性状精确到 0.01 mm。人工观测果核单果棱数、果核单果种粒数。

1.3 数据统计分析方法

计算各性状各种源平均值。采用 SAS 9.0 软件包对各性状进行残差分析,再将各性状与地理因子进行 1~4 次多项式回归^[20]。假定试验有 n 个种源,测定各种源平均值(Z_i ($i=1, 2, \dots, n$))。

当 x 、 y 、 e 的最高次数为 2 时,二次趋势面方程模型如下:

$$Z_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 e + \beta_4 x^2 + \beta_5 y^2 + \beta_6 e^2 + \beta_7 xy + \beta_8 xe + \beta_9 ye + \xi_i$$

式中: β 为回归系数; x 为经度; y 为纬度; e 为海拔, ξ 为随机误差。

回归方程的拟合系数(C)为回归平方和(U)占总平方和(S)的百分数,即 $C = (U/S) \times 100\%$ 。

表1 苦楝果核、种子性状观测的种源信息

序号	种源编号	采种点	北纬(N)	东经(E)	海拔/m	序号	种源编号	采种点	北纬(N)	东经(E)	海拔/m
1	170	福建尤溪	26°10'	118°11'	158	36	899	贵州麻江	26°29'	107°35'	1 048
2	247	江西赣州	25°52'	114°56'	148	37	905	浙江绍兴	30°00'	120°35'	12
3	271	江西南昌	28°41'	115°51'	16	38	959	浙江临安	30°14'	119°44'	40
4	372	湖南龙山	29°27'	109°26'	779	39	1 006	四川广元	32°26'	105°51'	490
5	373	湖南汝城	25°32'	113°41'	606	40	1 007	重庆市	29°31'	106°31'	183
6	413	广东郁南	23°08'	111°32'	21	41	1 108	安徽利辛	33°08'	116°12'	38
7	474	广东乐昌	25°08'	113°21'	100	42	1 109	安徽歙县	29°52'	118°25'	118
8	475	广东茂名	21°35'	110°55'	162	43	1 210	江苏姜堰	32°30'	120°07'	8
9	476	广东从化	23°33'	113°35'	35	44	1 211	江苏南京	32°00'	118°47'	22
10	477	广东乳源	24°57'	113°26'	84	45	1 212	江苏泰兴	32°08'	120°03'	7
11	478	广东兴宁	24°08'	115°44'	120	46	1 313	河南内乡	33°02'	111°50'	178
12	479	广东阳山	24°27'	112°37'	93	47	1 414	陕西安康	32°39'	109°01'	422
13	581	海南保亭	18°38'	109°42'	78	48	1 415	陕西南郑	32°59'	106°56'	716
14	582	海南东方	19°06'	108°39'	8	49	1 416	陕西蒲城	34°56'	109°35'	488
15	583	海南临高	19°55'	109°41'	29	50	1 417	陕西商洛	33°52'	109°50'	726
16	584	海南琼海	19°15'	110°27'	32	51	1 518	甘肃舟曲	33°46'	104°22'	1 354
17	585	海南琼中	19°02'	109°50'	237	52	1 565	甘肃陇南	33°24'	104°55'	1 027
18	586	海南三亚	18°15'	109°31'	5	53	1 619	河北邯郸	36°37'	114°32'	55
19	587	海南万宁	18°48'	110°23'	12	54	1 820	湖北郧县	32°50'	110°49'	192
20	631	广西钦州	21°55'	108°39'	250	55	101	福建连城	25°33'	116°42'	351
21	688	广西靖西	23°07'	106°25'	764	56	102	福建永安	25°43'	117°06'	373
22	689	广西临桂	25°14'	110°13'	162	57	204	江西赣县	25°54'	115°02'	115
23	690	广西灵川	25°25'	110°20'	171	58	205	江西于都	25°59'	115°25'	145
24	691	广西凭祥	22°06'	106°45'	255	59	308	湖南浏阳	28°02'	113°14'	137
25	692	广西钦南	21°56'	108°39'	14	60	412	广东仁化	25°20'	113°55'	196
26	693	广西上思	22°09'	107°59'	184	61	418	广东饶平	23°39'	117°00'	20
27	694	广西梧州	23°28'	111°16'	31	62	480	广东云浮	22°44'	111°55'	177
28	695	广西永福	24°59'	109°59'	152	63	523	海南海口	19°49'	110°15'	129
29	786	云南普洱	22°50'	100°58'	1 341	64	524	海南屯昌	19°24'	110°07'	160
30	797	云南开远	23°45'	103°16'	1 122	65	526	海南陵水	18°39'	109°52'	79
31	798	云南富宁	23°38'	105°37'	732	66	628	广西桂林	25°13'	110°17'	166
32	801	贵州石阡	27°30'	108°13'	496	67	843	贵州册亨	24°57'	105°42'	993
33	802	贵州玉屏	27°41'	108°37'	708	68	845	贵州罗甸	25°26'	106°45'	386
34	804	贵州贵阳	26°35'	106°38'	1 205	69	846	贵州荔波	25°24'	107°53'	467
35	856	贵州平塘	25°48'	107°22'	467	70	857	贵州望谟	25°09'	106°03'	522

在1~4次多项式回归计算中,将各性状回归拟合系数0.5以上,系数最高且各多项式分项系数都达到显著水平以上的回归方程作为最优回归方程。将试验点各种源海拔平均值代入各性状最优回归方程中,采用Surfer 13.0软件做各性状与经度、纬度趋势面图;再用试验点各种源经纬度平均值代入最优回归方程,采用SigmaPlot 10.0软件做各性状与海拔趋势曲线图。经度、纬度和海拔3个地理因子为采种点GPS记录数据。

采用SAS 9.0软件^[22]进行聚类分析,采用Genalex 6.5^[23]进行主分量分析。

2 结果与分析

2.1 不同种源各性状变异幅度和平均值

从表2可知:不同种源在12个性状上均存在明

显差异,其中,果核长为10.217~16.445 mm,均值13.077 mm;果核宽1为7.286~14.537 mm,均值为9.275 mm;果核宽2为6.990~13.575 mm,均值为8.930 mm;种子长为6.852~9.996 mm,均值为8.289 mm;种子宽1为2.247~3.983 mm,均值为2.967 mm;种子宽2为1.758~2.652 mm,均值为2.199 mm;果核皮厚1为0.936~2.795 mm,均值为1.492 mm;果核皮厚2为0.773~2.253 mm,均值为1.269 mm;种子棱数为4.870~7.070个,均值为5.574个;单果种子数为2.200~4.900个,均值为3.606个;种子百粒质量为1.033~3.943 g,均值为2.318 g;果核百粒质量为28.233~140.567 g,均值为47.850 g。各性状中果核百粒质量的变幅占均值(相对极差)的比重最大,为2.348,其次是种子百粒质量,种子长的相对极差最小,仅0.379。

表2 不同种源各性状观测平均值

种源号	果核长/mm	果核宽1/mm	果核宽2/mm	种子长/mm	种子宽1/mm	种子宽2/mm	果核皮厚1/mm	果核皮厚2/mm	种子棱数/个	种子数/个	种子百粒质量/g	果核百粒质量/g
101	12.167	8.718	8.314	7.609	2.860	2.018	1.585	1.184	5.80	3.53	1.860	38.433
102	12.333	8.874	8.513	8.662	3.018	2.300	1.306	1.611	5.47	3.37	1.897	38.567
170	13.098	9.328	8.863	6.852	2.557	2.078	1.451	1.286	5.47	3.53	1.560	47.167
204	12.178	7.590	7.401	8.022	2.847	2.245	1.239	1.219	5.23	3.47	2.407	34.833
205	13.600	8.994	8.689	8.667	3.056	2.199	1.810	1.217	5.30	3.83	2.663	39.100
247	11.769	9.293	8.749	8.277	3.193	2.284	1.441	1.417	5.27	3.40	2.577	44.033
271	14.310	8.898	8.530	8.243	3.007	2.182	1.264	0.774	5.50	3.53	2.587	43.900
308	16.445	9.217	8.884	9.996	3.168	2.292	1.172	1.112	5.80	3.80	3.233	56.667
372	13.994	9.435	9.057	8.650	3.000	2.314	1.627	1.448	5.53	3.80	2.550	48.400
373	12.714	9.026	8.653	9.560	3.259	2.476	1.223	1.136	4.90	3.10	2.817	42.600
412	12.215	9.075	8.750	7.960	2.894	2.275	1.376	1.291	5.40	3.80	2.087	45.767
413	13.002	8.080	7.780	7.399	2.651	2.176	1.155	1.061	5.23	2.83	1.930	28.400
418	12.740	8.565	8.143	8.315	3.025	2.195	1.488	1.113	5.80	3.67	2.323	43.367
474	10.217	9.421	9.023	6.987	2.757	2.048	1.592	1.260	5.63	2.50	1.997	33.733
475	14.237	9.156	8.708	8.594	2.795	1.957	1.301	0.920	6.03	4.30	2.383	42.767
476	11.949	9.305	8.961	8.051	2.997	2.180	1.676	1.436	5.00	3.30	1.670	46.800
477	13.100	8.603	8.390	8.523	2.608	2.056	1.238	1.258	5.17	3.27	2.180	35.567
478	13.885	9.717	9.221	9.314	3.187	2.108	1.566	0.994	5.87	4.13	2.553	53.133
479	14.520	9.065	8.759	8.861	3.134	2.470	1.115	1.133	5.03	3.43	3.250	42.867
480	12.598	8.743	8.464	7.628	2.585	2.010	1.536	1.190	5.93	3.57	2.003	30.733
523	12.698	8.880	8.527	7.967	2.638	2.037	1.711	1.264	5.63	4.27	1.987	45.800
524	13.010	8.792	8.480	8.256	2.787	1.995	1.386	1.144	5.77	4.73	1.850	52.233
526	13.006	9.580	9.299	8.158	2.797	2.093	1.619	1.330	5.40	4.20	1.943	55.200
581	14.291	10.496	10.178	8.797	2.782	2.054	1.853	1.490	6.03	4.50	1.847	75.167
582	12.205	9.462	9.235	7.791	2.719	1.905	1.450	1.406	5.27	4.03	1.690	43.500
583	11.592	7.803	7.575	7.465	2.499	2.048	1.198	1.100	5.07	3.70	1.873	29.633
584	12.654	9.288	9.015	7.664	2.645	2.165	1.579	1.382	5.50	4.23	2.377	43.233
585	13.763	8.406	8.116	7.406	2.628	2.146	1.394	1.286	5.33	3.83	1.787	40.567
586	14.970	10.375	10.101	9.416	2.839	1.940	1.836	1.807	5.23	3.97	1.540	81.767
587	13.963	10.104	9.800	8.286	2.685	1.817	1.955	1.964	5.40	3.43	1.923	67.933
628	13.767	8.550	8.260	8.493	2.930	2.044	1.469	1.253	5.60	3.43	2.090	38.800
631	13.518	8.775	8.467	8.281	2.617	2.089	1.357	1.140	5.60	4.57	2.107	44.000
688	12.236	8.855	8.544	8.257	2.978	2.416	1.462	1.461	5.63	2.90	1.117	43.433
689	12.101	8.700	8.422	8.488	2.943	2.238	1.647	1.402	5.40	3.20	2.510	39.333
690	12.271	8.885	8.558	8.236	2.807	2.179	1.514	1.288	5.50	3.50	2.250	48.700
691	10.928	7.286	6.990	6.878	2.247	1.758	1.214	1.554	5.00	3.30	1.377	28.867
692	13.472	8.094	7.758	8.198	2.658	1.935	1.307	1.103	5.63	4.17	2.063	36.067
693	10.275	8.580	8.286	7.512	2.812	1.974	1.476	1.303	5.87	3.33	1.830	34.433
694	13.519	9.066	8.746	7.790	2.868	2.141	1.452	1.241	5.33	3.67	1.930	40.633
695	12.799	8.181	7.804	8.068	2.957	2.258	1.404	1.220	5.57	3.70	2.263	44.767
796	11.496	8.782	8.365	7.947	3.195	2.247	1.457	1.066	5.63	3.83	2.280	44.567
797	14.459	10.310	9.870	8.290	3.302	2.542	2.795	2.253	6.33	3.37	3.257	119.667
798	14.090	10.310	9.885	8.411	2.993	2.170	1.947	1.778	5.17	3.07	2.443	64.033
801	12.581	8.913	8.630	7.883	2.870	2.094	1.210	0.952	5.77	4.17	2.270	42.333
802	13.517	8.203	7.956	9.006	3.113	2.597	1.158	1.042	4.87	2.20	3.330	36.267
804	14.747	11.705	11.343	8.729	3.509	2.397	1.990	1.772	6.43	4.90	2.913	85.067
843	14.221	12.329	11.927	7.358	3.115	2.215	1.718	1.503	6.63	4.30	2.183	93.033
845	13.313	8.957	8.831	8.448	2.730	2.009	1.394	1.304	5.23	3.23	1.900	42.500
846	12.895	8.608	8.258	8.303	2.618	2.057	1.558	1.580	5.27	3.13	1.753	35.367
856	13.650	8.826	8.590	8.043	2.710	2.124	0.975	0.985	6.10	4.43	2.143	34.200
857	11.532	10.591	10.111	7.694	2.964	2.189	2.019	1.324	5.70	2.57	1.917	45.833
899	11.521	8.295	8.057	7.502	2.748	2.059	1.079	1.088	5.30	3.90	1.963	39.700
905	11.834	8.835	8.488	7.645	2.994	2.156	1.493	1.017	5.80	3.60	1.930	37.200
959	14.854	9.103	8.830	9.219	3.040	2.416	1.220	0.941	5.33	3.07	2.740	42.067
1006	13.150	10.014	9.629	9.071	3.451	2.581	1.584	1.542	5.90	3.03	3.783	33.500
1007	14.333	10.481	9.826	9.968	3.287	2.652	1.731	1.132	6.40	3.73	3.590	54.900
1108	12.906	9.072	8.851	8.160	3.123	2.362	1.327	1.243	5.37	3.53	2.610	46.233
1109	13.322	9.404	9.004	8.551	3.031	2.405	1.493	1.041	5.23	4.17	2.417	48.900
1210	11.924	8.333	8.091	8.217	3.170	2.200	0.936	0.972	4.93	2.53	2.797	35.000
1211	12.762	10.207	9.803	8.985	3.357	2.481	1.487	1.177	5.93	2.93	3.673	50.833
1212	13.272	8.229	8.070	8.859	2.837	2.271	1.173	0.827	5.33	3.20	2.650	36.233
1313	11.949	8.091	7.747	7.405	2.821	2.085	1.062	0.876	5.17	3.77	2.260	28.233
1414	13.120	10.038	9.684	8.951	3.401	2.486	1.615	1.153	5.77	3.13	1.663	47.667
1415	12.778	9.758	9.388	8.241	3.302	2.422	1.523	1.343	5.23	3.50	2.483	44.833

续表2

种源号	果核长/mm	果核宽1/mm	果核宽2/mm	种子长/mm	种子宽1/mm	种子宽2/mm	果核皮厚1/mm	果核皮厚2/mm	种子棱数/个	种子数/个	种子百粒质量/g	果核百粒质量/g
1416	13.665	8.957	8.667	8.740	3.035	2.120	1.868	1.625	5.77	3.87	2.307	43.200
1417	12.894	10.280	9.812	8.114	3.315	2.105	1.276	0.971	5.33	3.13	2.493	49.000
1518	15.417	14.537	13.575	9.275	3.983	2.608	2.477	1.697	7.07	4.10	3.930	66.400
1565	15.421	13.345	12.738	9.204	3.963	2.511	2.022	1.442	6.93	4.40	3.943	140.567
1619	12.461	8.659	8.421	7.990	3.102	1.924	1.270	0.773	5.30	3.13	1.033	34.067
1820	13.211	10.332	10.070	8.464	3.190	2.338	1.139	1.369	5.83	3.67	2.697	57.167
极值范围	10.217 ~ 16.445	7.286 ~ 14.537	6.990 ~ 13.575	6.852 ~ 9.996	2.247 ~ 3.983	1.758 ~ 2.652	0.936 ~ 2.795	0.773 ~ 2.253	4.870 ~ 7.070	2.200 ~ 4.900	1.033 ~ 3.943	28.233 ~ 140.567
均值	13.077	9.275	8.930	8.289	2.967	2.199	1.492	1.269	5.574	3.606	2.318	47.850
相对极差	0.476	0.782	0.737	0.379	0.585	0.407	1.246	1.166	0.395	0.749	1.256	2.348

2.2 各种源性状与地理因子多项式趋势面分析

2.2.1 与经度和纬度的多项式趋势面分析 对各种源性状与采种点北纬、东经和海拔作1~4多项式回归分析,结果(表3)表明:12个性状中,果核宽1、果核宽2、种子宽1、种子宽2、果核皮厚2、种子百粒质量和果核百粒质量等7个性状拟合系数都在0.5以上,除种子宽2常数项外,其他各分项系数都达显著水平以上,可用于分析性状变异的地理趋势。从分项系数可以看出:果核宽2、种子宽2、果核皮厚2受经度影响较大,而种子百粒质量、果核百粒质量受纬度影响更大。果核长、种子长和果核皮厚1的分布区范围地理变异模式尚未充分表达,变异幅度较小,趋势不明显。

分别对各种源性状与采种点北纬、东经趋势面作图。由图1可知:果核宽1呈西南-东北梯度变异趋势,而果核宽2呈西-东变异趋势。来自西北部的种源果核宽于东南部种源,东北部种源果核最宽。在同一经度上,甘肃种源的果核较云南、贵州种源的果核宽,河南、陕西、山东种源的果核较福建、江西种源果核宽。陕西、山东种源的果核较云南、广西种源果核宽;江西、福建种源的果核较广东、海南种源的宽。

由种子宽趋势面(图2)可知:种子宽呈西南-东北梯度变异。来自西北部种源的种子宽1大于东南部种源,而东南部种源的种子宽2大于西北部种源。总体呈东北部种源大于西南部种源。

由图3看出:果核皮厚2主要呈南-北梯度变异趋势。北部种源的果核棱深、皮厚,南方种源的果核圆润、皮薄;种子百粒质量、果核百粒质量主要呈西北-东南梯度变异趋势,西北部种源海拔高,种子、果核宽大,百粒质量更大。

表3 各观测性状与地理因子多项式回归分析

性状	多项式变量	分项系数	标准误	P值	拟合系数C
果核宽1	常数项	-0.440	0.125	0.001	0.656
	x^2	0.196	0.079	0.016	
	ye	-0.575	0.166	0.001	
	xy^2	0.539	0.152	0.001	
	y^2e	0.263	0.094	0.007	
	x^2ye	0.525	0.135	0.000	
	xy^2e	0.390	0.053	<0.000 1	
果核宽2	常数项	-0.434	0.105	0.000	0.652
	x	0.339	0.106	0.002	
	ye	-0.583	0.157	0.000	
	x^2e	-0.320	0.100	0.002	
	ye^2	-0.374	0.083	<0.000 1	
	x^3e	0.277	0.050	<0.000 1	
	y^2e^2	-0.230	0.046	<0.000 1	
种子宽1	常数项	2.261 64	0.116	<.0001	0.615
	xy^2	1.830×10^{-6}	3.650×10^{-7}	<0.000 1	
	x^3e	1.130×10^{-8}	4.570×10^{-9}	0.016	
	xe^3	6.470×10^{-12}	2.990×10^{-12}	0.034	
种子宽2	常数项	0.173	0.099	0.087	0.596
	x	0.777	0.254	0.003	
	xy	-0.745	0.180	0.000	
	xe	-0.574	0.157	0.001	
	x^3	-0.296	0.080	0.000	
	xy^2	0.378	0.110	0.001	
	y^2e	0.175	0.039	<0.000 1	
果核皮厚2	常数项	-0.249	0.173	0.016	0.524
	x^2	-0.799	0.339	0.023	
	y^2	0.262	0.142	0.007	
	xe^2	-0.619	0.178	0.001	
	y^2e	0.485	0.099	<0.000 1	
	x^4	0.331	0.113	0.005	
	x^2y^2	0.169	0.120	0.017	
种子百粒质量	常数项	0.139	0.111	0.022	0.572
	y	0.338	0.169	0.050	
	x^2	-0.217	0.087	0.015	
	xy	-0.445	0.133	0.001	
	y^3	-0.337	0.071	<0.000 1	
	xy^2	0.962	0.143	<0.000 1	
	xye	0.315	0.148	0.038	
果核百粒质量	常数项	-0.348	0.074	<0.000 1	0.548
	y	0.150	0.096	0.013	
	xe	-0.673	0.230	0.005	
	x^2e	-0.206	0.070	0.005	
	ye^2	-0.407	0.066	<0.000 1	
	x^3e	0.421	0.106	0.000	

注:多项式变量中 x 为经度, y 为纬度, e 为海拔。

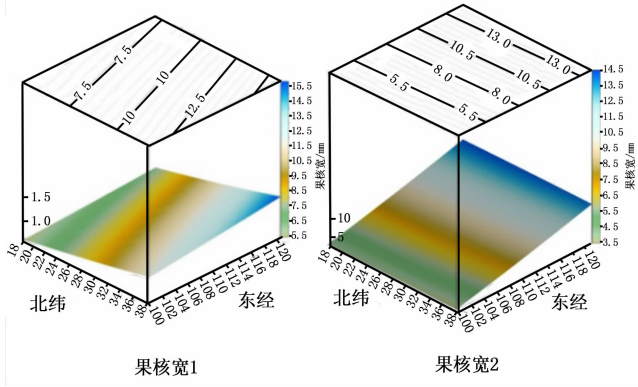


图1 果核宽与经纬度趋势面图

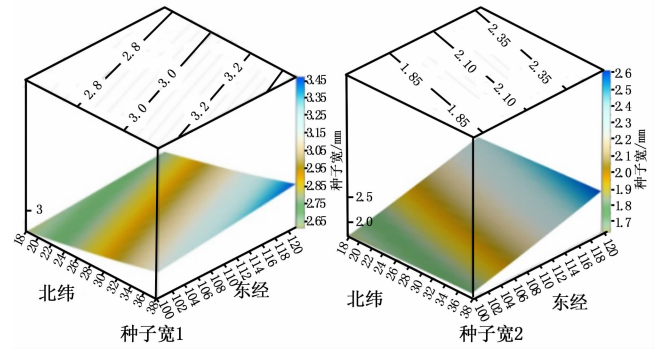


图2 种子宽与经纬度趋势面图

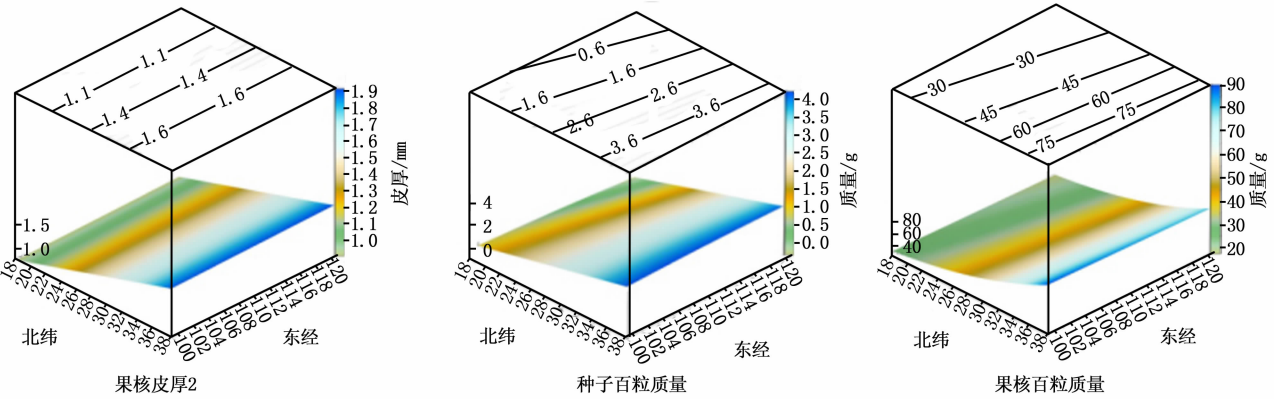


图3 果核皮厚、百粒质量与经纬度趋势面图

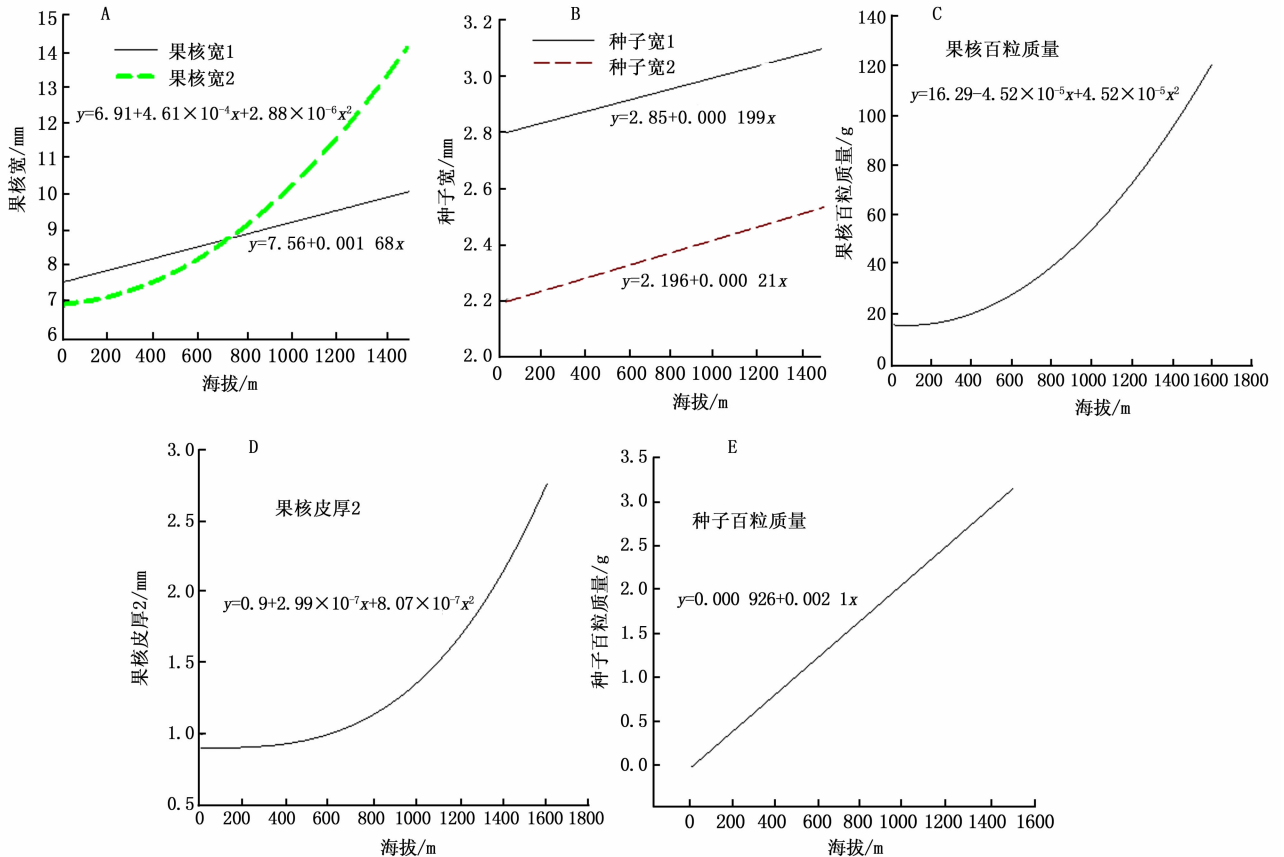


图4 果核、种子性状与采种点海拔趋势曲线

2.2.2 与海拔的趋势曲线分析 将平均经度和平均纬度代入各性状的最优多项式中,分别做海拔曲线图。从图4可知:果核宽1、种子宽、种子百粒质量与采种点海拔呈正相关关系,果核宽1和种子随采种点海拔增加而更大,种子质量更大,曲线呈直线型;果核宽2、果核百粒质量和果核皮厚2随采种点海拔的增加,果核更大,种子质量增加,且采种点海拔越高,变异幅度越大,曲线呈倒抛物线型。

2.3 基于果核、种子表型性状的种源类群划分

对种源间果核、种子性状数据进行标准化后,采用可变距离法对12个性状进行种源聚类分析,聚类结果见图5。根据不同的聚类分析参数,不同种源聚类结果不同:根据聚类分析参数 R^2 值和半偏 R^2 值,将不同种源聚为4类;根据伪 F 值将不同种源聚为5类;而按伪 T^2 值将各种源聚为3类。综合4个聚类分析参数,在聚类距离2.2时,将70个种源聚为4类。计算4个聚类群各性状均值,并统计各类群果核径长比、种子径长比(表4)。

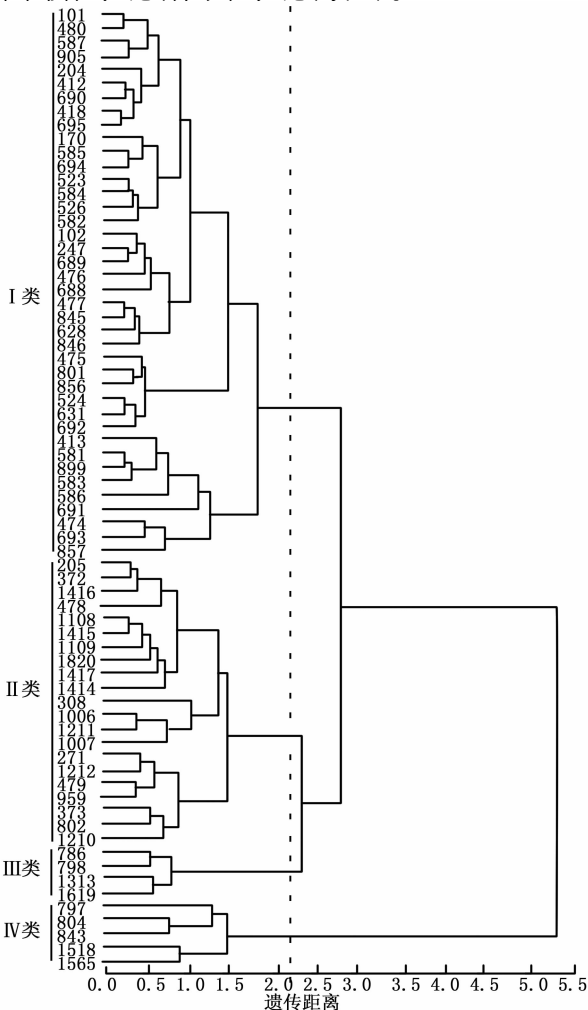


图5 种源间果核、种子性状可变距离法聚类分析

从聚类图5和表4可知:类群I主要有101、102、170、204、247、905、412、413、418、474、475、476、477、480、523、524、526、581、582、583、584、585、586、587、628、631、690、691、692、693、694、695、688、689、801、845、846、856、857和899种源,主要为广东、广西、海南和部分福建、江西、贵州及个别的湖南种源,这部分种源果核细小、皮薄、棱较多、质量小,单果种粒少,种子细小;类群II主要有205、271、372、373、308、478、479、802、959、1006、1007、1108、1109、1210、1211、1212、1414、1415、1416、1417和1820,主要为江西、湖南、四川、安徽、江苏、湖北、陕西和个别的贵州、浙江种源,这部分种源果核中等大小,种子又宽又长,种子质量较大;类群III有786、798、1313和1619种源,来自云南、河南、河北地区,这些种源的种子果核较宽大、皮厚、质量大,单果种粒多,种子细长、圆润、质量小;类群IV主要有797、804、843、1518和1565种源,主要为云南、甘肃和部分贵州种源,这些种源果核宽大、皮厚、棱数多且深、质量最大、果型近圆形,单果种粒数均值较最少的类群多19.4%,种子最宽、质量最大。

表4 不同聚类群各性状平均值

性状	聚类群			
	I	II	III	IV
果核长/mm	12.47	13.58	14.33	14.85
果核宽1/mm	8.76	9.37	10.32	12.45
果核宽2/mm	8.44	9.02	9.99	11.89
果核径长比	0.70	0.69	0.72	0.84
种子长/mm	7.92	8.85	8.73	8.57
种子宽1/mm	2.80	3.16	2.82	3.57
种子宽2/mm	2.10	2.36	2.00	2.45
种子径长比	0.35	0.36	0.32	0.42
果核皮厚1/mm	1.41	1.40	1.90	2.20
果核皮厚2/mm	1.23	1.15	1.76	1.73
单果棱数/个	5.50	5.48	5.46	6.68
单果种粒数/个	3.63	3.40	3.74	4.21
种子百粒质量/g	1.98	2.80	1.94	3.25
果核百粒质量/g	40.08	45.36	72.23	100.95

对70个种源进行主分量分析(PCoA),前3个主分量累计贡献率分别为52.23%、66.34%和76.21%,对前2个主分量作二维双标图,从图6看出:70个种源在前2个主分量作用下可以较为明显的分为4类,地理距离相近的种源大多聚为一类。类群I的691(凭祥)种源偏离聚类中心较远,但离类群I最近;类群III的798种源接近类群I,这些都是其他分量的影响所致。主分量分析结果与聚类结果大致相同。

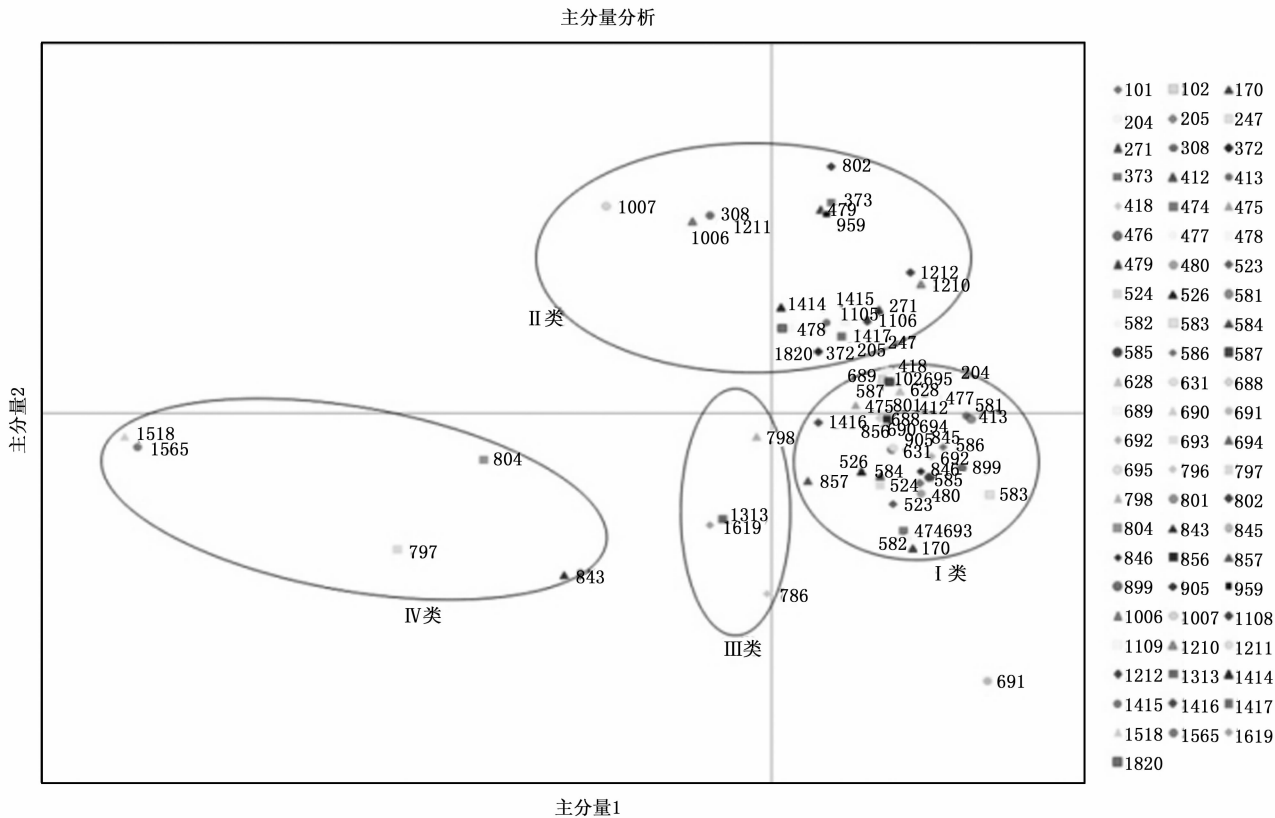


图 6 种源间主分量二维双标图

3 讨论

本文采用趋势面对全分布区苦楝进行地理变异模式分析,结果表明:多项式趋势面分析可以揭示苦楝各性状的地理趋势,为苦楝种源区划和种子调拨提供参考。

趋势面分析是在大范围的群体采样基础上,通过对群体数据进行趋势拟合,展现各性状地理变异在分布区块的具体变化趋势。多项式趋势面分析技术曾被成功应用于我国的油松、杉木和侧柏及加拿大扭叶松的种源区划研究中,实践结果证明,该技术对林木种源区划具有一定的指导作用。在没有获得长期的生长数据时,先采用自然林分的部分性状对不同种源进行预划分,可以初步确定地理变异的趋势。

苦楝果核和种子性状的地理变异受经度、纬度变异的双重控制,以纬向变异为主,呈连续的渐变群地理变异模式。除果核宽 2 呈西-东变异趋势外,其他果核、种子宽度主要呈西南-东北梯度变异;种子百粒质量、果核百粒质量主要呈西北-东南梯度变异;果核皮厚 2 主要呈南-北梯度变异趋势;而其他

性状,如果核长、种子长和果核皮厚 1 的分布区范围地理变异模式尚未充分表达,变异幅度较小,趋势不明显。中国苦楝不同种源在生长量、种子大小和形状、发芽率、发芽势、果实、叶片等性状存在明显的地理变异,其地理变异模式受经度和纬度双重控制,以纬度变异为主^[16-21,24-26],本研究结果与上述性状的研究结果基本一致。树种的地理变异除受经纬度影响外,也受到海拔高度的影响。本研究表明,海拔越高,温度越低,对苦楝各个性状的发育情况也有变异趋势的影响。果核宽 1、种子宽、种子百粒质量与采种点海拔呈正相关关系,果核和种子随采种点海拔增加而更加宽大,种子质量更大。相比于傅里叶趋势面分析和更高次的趋势面分析方法和结果,本研究分析的局部地理变异趋势不明显;但局部区域受生态气候微环境的影响较多,采用更多的实地考察方法,结果或许更可靠。

果核和种子的形态特征是相对稳定的性状,常用于植物品种鉴定与分类,也是地理变异研究的重要性状。可变距离聚类法分析和主分量分析结果一致,都将 70 个种源聚为 4 类。采用欧氏距离离差平方和^[20](方法 1)对 18 个性状的聚类分析结果表

明:在聚类距离 5.5 时,将 70 个种源分为 4 类群,在聚类距离 3.0 时,分为 8 类群;采用可变距离法(方法 2)对 12 个性状聚类分析,将 70 个种源分为 4 类群。比较 2 种方法的分析结果,存在以下异同点:(1)方法 1 在 3.0 聚类距离的第 8 类群和方法 2 的类群 IV 结果一致;(2)方法 2 中类群 I 包括方法 1 中的第 1、2、3、4 类群;类群 II 包含方法 1 中的第 5、7、8 类群;(3)由于方法 1 分析中存在二次性状(如果形系数、棱粒比等),相当于加强了部分种源特性的权重值;但是在去除这些二次性状后,部分省的种源聚类发生了变化,尤其是贵州省的种源,在方法 2 中多分散在不同的小类群中,这是 2 种方法的分歧点;(4)2 种方法中,苦楝种源分布存在几个较稳定的聚类中心,广东、广西、海南聚类中心;云南、贵州和甘肃聚类中心;其他种源以陕西、安徽、湖北、湖南、江苏、江西、河南、河北为聚类中心。根据果核、种子性状和大小,也有可能将相距较远的几个种源聚为一起,如方法 2 中的类群 III。方法 2 中聚类距离为 2.5 时,类群 III 被合并到类群 II 中,说明 2 种聚类方法的主要聚类中心一致,但由于分析方法和性状的差异,个别种源聚类群的归属存在分歧,在楝树亲缘地理研究中继续说明该问题。

4 小结

苦楝各种源间形态差异明显,地理变异较大。随地理因子的变化,种源间形成了逐步的变异趋势以适应环境变化,并在长期的进化中逐渐形成各自的适应特征。根据形态差异可以对苦楝进行初步的种源区划,而进一步增加分子遗传证据,以及中长期多点种源试验是验证苦楝区划可靠性的重要方法。

参考文献:

- [1] 程诗明,顾万春. 苦楝表型区划的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(3): 337-341.
- [2] Peng H, David J M. Flora of China[M]. Wu Z, Peter H R.; Missouri Botanical Garden Press; St. Louis, MO, USA; Science Press; Beijing, China, 2008(11): 130-131.
- [3] 陈伯望,洪菊生. 杉木种源胸径生长地理变异的趋势面分析[J]. 林业科学, 1995, 31(2): 110-115.
- [4] 徐化成,郭广荣,冯林,等. 油松天然林的生长与地理-气候因素的关系[J]. 北京林学院学报, 1981, 2(4): 9-14.
- [5] 陈晓阳,陈振丙,吴栓柱,等. 侧柏种苗性状地理变异趋势及其气候生态基础[J]. 河南林业科技, 1990(1): 5-10.
- [6] 陈晓阳,沈熙环,石文玉,等. 侧柏不同种源在北京越冬和生长表现[J]. 北京农学院学报, 1990, 5(1): 19-26.
- [7] 陈晓阳,王东洋,吴栓柱,等. 侧柏种源苗木根系性状遗传变异的研究[J]. 北京林业大学学报, 1990, 12(2): 13-20.
- [8] Ying C C, Square V. Performance of lodgepole pine provenances at sites in southwestern british columbia[J]. Silvae Genetica, 1991, 40(5-6): 215-223.
- [9] Ying C C, Yanchuk A D. The development of British Columbia's tree seed transfer guidelines: Purpose, concept, methodology, and implementation[J]. Forest Ecology & Management, 2006, 227(s1-2): 1-13.
- [10] 梁一池,陈祖松. 侧柏种源的地理变异趋势[J]. 福建林学院学报, 1989, 9(2): 134-139.
- [11] 李纪元,饶龙兵,杨伟增. 枫杨种源苗期高生长地理变异的趋势面分析[J]. 中南林学院学报, 2003, 23(1): 15-19.
- [12] 陈存及,邱尔发,梁一池,等. 毛竹种源地理变异规律及选择的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2001(3): 20-28.
- [13] 叶志宏,施季森,翁玉榛,等. 杉木地理种源变异模式[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 1990, 14(4): 15-22.
- [14] 董玉峰,姜岳忠,马玲,等. 苦楝遗传改良研究进展[J]. 山东林业科技, 2010, 189(4): 104-107.
- [15] 夏海涛. 药用苦楝遗传多样性 ISSR 分析和遗传变异规律研究[D]. 福州:福建农林大学, 2009: 78.
- [16] 崔赞栋,傅兆祥,王建华,等. 苦楝种源试验研究[J]. 河南林业科技, 1994, 44(2): 14-16.
- [17] 程诗明. 苦楝聚合群体遗传多样性研究与核心种质构建[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2005.
- [18] 程诗明,顾万春. 苦楝表型性状梯度变异的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(5): 29-35.
- [19] 陈丽君,刘明骞,廖柏勇,等. 苦楝不同种源苗期生长性状和生长节律研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(4): 1-7.
- [20] 陈丽君,邓小梅,丁美美,等. 苦楝种源果核及种子性状地理变异的研究[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(1): 15-20.
- [21] 廖柏勇,陈晓阳,陈丽君,等. 苦楝种源间种子发芽变异的观测[J]. 广东农业科学, 2014(11): 43-47.
- [22] 黄少伟,谢维辉. 实用 SAS 编程与林业试验数据分析[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2001: 182-190.
- [23] Peakall R, Smouse P E. GenAlEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research-An update[J]. Bioinformatics, 2012, 28: 2537-2539.
- [24] 陈羨德,陈礼光,阙茂文,等. 不同种源苦楝幼林试验初步研究[J]. 福建林学院学报, 2008, 28(1): 23-26.
- [25] 教忠意. 盐胁迫对苦楝育苗及生理特性的影响[D]. 南京:南京林业大学, 2009: 73.
- [26] 王家源,郭杰,喻方圆. 不同种源苦楝种子生物学特性差异[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2013, 37(1): 49-54.

(责任编辑:徐玉秀)