

长柄扁桃天然种群表型变异

柳江群 尹明宇 左丝雨 杨绍斌 乌云塔娜*

中国林业科学研究院经济林研究开发中心, 郑州 450003

摘要 为揭示长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)天然种群的表型多样性特点, 通过方差分析、相关分析、聚类分析和t检验等方法对7个天然种群14个表型性状种群间和种群内的表型变异特征和地理变异模式进行了探讨。结果表明: 长柄扁桃种群内变异为40.91%, 种群间变异为35.29%, 种群内大于种群间, 种群内变异是主要变异来源; 其平均表型分化系数为45.90%, 各表型性状平均变异系数为15.59%, 变幅9.39%–31.98%, 表型变异在种群内和种群间均非常丰富。年平均气温、纬度、无霜期、经度和海拔5个主要地理生态因子对长柄扁桃表型性状影响显著或极显著, 平均气温和无霜期是不同立地长柄扁桃表型差异的主要影响因子。主成分分析和聚类分析将7个种群区划为两大类, 其中山地的长柄扁桃叶多为近圆形至长圆形, 果多为近球形, 果柄较短, 果肉较厚, 核多为宽卵形至圆球形; 沙地的长柄扁桃叶多为长椭圆形或卵状披针形, 果为卵球形, 果柄较长, 果肉较薄, 核近宽卵形。探讨长柄扁桃天然种群表型多样性, 可为顺利开展野生资源收集、良种选育等工作提供依据。

关键词 长柄扁桃; 天然种群; 表型变异; 相关分析

引用格式: 柳江群, 尹明宇, 左丝雨, 杨绍斌, 乌云塔娜 (2017). 长柄扁桃天然种群表型变异. 植物生态学报, 41, 1091–1102. doi: 10.17521/cjpe.2017.0104

Phenotypic variations in natural populations of *Amygdalus pedunculata*

LIU Jiang-Qun, YIN Ming-Yu, ZUO Si-Yu, YANG Shao-Bing, and WUYUN Tana*

Non-Timber Forest Research and Development Center, Chinese Academy of Forestry, Zhengzhou 450003, China

Abstract

Aims Our objectives were to determine the phenotypic variations, adaption and distribution patterns in seven natural *Amygdalus pedunculata* populations.

Methods We analyzed 14 phenotypic traits from 120 individuals in seven populations of *A. pedunculata* by variance analysis, correlation analysis, and cluster analysis.

Important findings Results showed that there were plentiful phenotypic variation within and among populations. In particular, the phenotypic variation within population was 40.91%, higher than that among populations (35.29%), which indicated that the phenotypic variation within population was the main source of the phenotypic variation in *A. pedunculata*. Mean differentiation coefficient was 45.90%, and mean coefficient of variation of 14 traits was 15.59%, ranged from 9.39% to 31.98%. Mean annual temperature, latitude, length of frost-free period, longitude and altitude appear to be prominent ecological factors influencing phenotypic traits. Mean annual temperature and length of frost-free period were key indicators to phenotypic of *A. pedunculata* in different site conditions. According to principal component analysis and unweighted pair-group method with arithmetic means (UPGMA) cluster analysis, the seven populations of *A. pedunculata* could be divided into two groups. In mountainous region, *A. pedunculata*'s leaf blade was usually rotund to oblong, fruit nearly spherical shape with shorter fruit stem, stone was usually ovoid to spherical shape. In contrast, in sandy region, leaf blade was long oval to ovate-lanceolate, fruit and stone was usually flat ovoid with longer fruit stem. Our results provide critical information for the resource collection and breeding of this ecologically important species.

Key words *Amygdalus pedunculata*; natural population; phenotypic variation; correlation analysis

Citation: Liu JQ, Yin MY, Zuo SY, Yang SB, Wuyun T (2017). Phenotypic variations in natural populations of *Amygdalus pedunculata*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 1091–1102. doi: 10.17521/cjpe.2017.0104

Pigliucci等(2006)指出表型多样性是植物对环境适应和基因表达的共同结果, 植物天然种群在自

然选择压力下所产生的表型多样性在适应和物种进化上有重要意义(李斌等, 2002)。植物种群的表型多

收稿日期Received: 2017-04-21 接受日期Accepted: 2017-07-10

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: tanatanan@163.com)

样性是引种驯化和良种选育工作的基础, 利用表型研究种群多样性具有方便、快捷、周期短、成本低、见效快等特点。已有专家学者利用表型变异对葛萝槭(*Acer grosseri*)(孟超等, 2013)、板栗(*Castanea mollissima*)(江锡兵等, 2014)、梨(*Pyrus*)(张莹等, 2016)、核桃(*Juglans regia*)(徐永杰等, 2016)、云南松(*Pinus yunnanensis*)(邓丽丽等, 2016; 徐杨等, 2016)、鸡爪槭(*Acer palmatum*)(黄东静等, 2016)等树种天然种群进行了多样性分析与评价, 阐明了种群变异结构和来源; 在对表型变异模式研究方面, 发现种群间的表型多样性与地理气候因子等有密切联系(Via, 1993; García *et al.*, 2000), 云南松(徐杨等, 2016)的针叶性状变异、红棕杜鹃(*Rhododendron rubiginosum*)(苏应雄等, 2017)的表型性状多样性与海拔密切相关, 脱皮榆(*Ulmus lamellosa*)(郑昕等, 2013)的叶性状呈现经度、纬度和海拔的多重变异规律。

长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*), 在原产地别名野樱桃、毛樱桃等(姬钟亮和钱安东, 1981; 苏贵兴和姚玉卿, 1983), 属蔷薇科桃属多年生落叶小灌木, 主要分布于我国内蒙古阴山山脉浅山地区和内蒙古陕西交界处的沿线沙漠中(姬钟亮和钱安东, 1981)。长柄扁桃在我国干旱、半干旱地区具有良好的防风固沙等综合效应, 其适应性强, 耐寒、抗旱、耐盐、耐贫瘠(郭春会等, 2005)。长柄扁桃种仁富含蛋白质和油脂, 种仁含蛋白质15%–30% (王娅丽等, 2012), 含油率达55%以上(李聪等, 2010); 油脂以不饱和脂肪酸为主, 抗氧化性好, 维生素E含量丰富(张萍等, 2004), 种仁油质量高, 具有广泛应用前景; 其种壳还可加工成活性炭(李冰等, 2010)。总之, 长柄扁桃是集生态与经济效益于一体的木本油料生态树种, 具有广阔的研究、开发及应用前景。由于长柄扁桃生境恶劣, 长期处于野生状态未被重视, 加上人为影响等多种因素, 长柄扁桃野生种质资源已濒临险境, 赵一之(1992)将其列为濒危植物。

王伟等(2014)对长柄扁桃坚果表型变异进行了探讨, 左丝雨等(2015)对长柄扁桃叶片的表型多样性进行了分析, 其他研究主要集中在其特性(郭春会等, 2005; 蒋宝等, 2008; 郭改改等, 2013a, 2013b)、种仁成分(侯国峰, 2014; 许新桥, 2015; 姜仲茂等, 2016)和加工利用(李冰等, 2010; 徐金娟等, 2011; 许龙, 2014)等方面, 而鲜见对长柄扁桃天然

种群表型多样性的研究, 这不利于长柄扁桃良种选育工作的顺利开展。本研究以7个长柄扁桃天然种群及其14个表型性状为研究对象, 研究表型性状和地理与生态因子之间的相关性, 探索其表型变异特点和性状地理分布格局, 为种源区划、种质资源收集与保护、优良品种选育与利用提供理论依据, 为深入开发利用这一濒危植物资源提供数据资料。

1 材料和方法

1.1 材料来源和样品采集

基于前期的资料搜集、文献查阅和实地踏查, 2014年3月至2015年7月对长柄扁桃7个天然种群的完整叶片和成熟果实进行采集与形态数据测定等工作。采样点分别为: 陕西榆林市小纪汗乡(YYe)、神木县(SYe); 内蒙古包头市忽鸡沟(HJG)、碎石场(SSC)、前店(QD); 呼和浩特市喇嘛洞(LMD)、小井沟(XJG); 每个采样点分别设为一个种群, 一共有7个种群, 120个植株, 基本能代表我国长柄扁桃天然种群整体分布情况和分布特点。采样时, 每个采样单株都进行GPS定位并记录其经纬度和海拔等地理数据, 单株间距80–100 m, 按东西南北4个方向随机采摘无病虫害、健康、成熟、完整的叶片和果实各10个, 低温保鲜后带回实验室。7个采样点的地理分布和气候因子等基本概况见表1, 气象数据见中国气象数据网(data.cma.cn)。

1.2 表型性状的测定

参照《扁桃种质资源描述规范和数据标准》(张大海, 2009)和《中国果树志: 桃卷》(汪祖华和庄恩及, 2001)等资料中的测定方法, 选择了14个易于获取和测定且遗传上相对稳定的表型性状, 用游标卡尺(精确度为0.01 mm)分别测定并记录长柄扁桃的其叶长、叶宽、叶柄长、果纵径、果横径、果侧径、果柄长、肉厚、核纵径、核横径和核侧径, 然后根据叶长/叶宽、果纵径/果横径、核纵径/核横径计算叶形指数、果形指数和核形指数等形状指标。

1.3 数据处理和分析

采用巢式方差分析研究长柄扁桃表型性状在种群间和种群内的差异显著性, 线性模型为: $y_{ijn} = \mu + \alpha_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{ijn}$, y_{ijn} 为第*i*个种群的第*j*个个体的第*n*个观测值, μ 为总体平均值, α_i 为第*i*个种群的效应值(固定), $\beta_{j(i)}$ 为第*i*个种群内第*j*个个体的效应值(随机), ε_{ijn} 为第*ijn*个观测值的试验误差(李斌等, 2002; 顾万春,

表1 长柄扁桃各天然种群的地理位置及主要气候因子
Table 1 Geographical locations and main climatic conditions for the seven *Amygdalus pedunculata* populations sampled

种群 Population	取样株数 Individual of samples	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)	年平均气温 AAT (°C)	年日照时间 AAS (h)	年降水量 AP (mm)	无霜期 Frost-free day (d)	立地类型 Site types
小纪汗乡 YYe	20	109.20°	38.45°	1 294	8.1	2 879	413.9	154	沙地 Sand
神木县 SYe	9	109.87°	38.85°	1 268	8.8	2 876	436.6	169	沙地 Sand
忽鸡沟 HJG	17	110.09°	40.75°	1 416	4.5	2 970	280.0	120	山地 Mountainous region
碎石场 SSC	11	110.10°	40.77°	1 430	4.0	3 077	300.0	116	山地 Mountainous region
喇嘛洞 LMD	6	110.30°	40.78°	1 222	3.1	2 952	362.8	118	山地 Mountainous region
前店 QD	9	110.08°	40.77°	1 516	3.6	3 012	330.8	120	山地 Mountainous region
小井沟 XJG	48	111.83°	40.98°	1 386	3.7	2 863	489.3	95	山地 Mountainous region

AAT, mean annual temperature; AAS, annual average sunshine; AP, annual precipitation; HJG, Huji Ditch; LMD, Lamadong; QD, Qiandian; SSC, Suishichang; SYe, Shenmu County; XJG, Xiaojin Ditch; YYe, Xiaojihan Village.

2004)。进行邓肯氏多重比较和差异性检验, 分别计算7个种群各个性状的平均值(\bar{X})、标准偏差(SD)、表型分化系数(V_{st})和变异系数(CV), $V_{st} = \delta_{U_s}^2 / (\delta_{U_s}^2 + \delta_s^2)$, $CV = SD / \bar{X}$, 其中 $\delta_{U_s}^2$ 为种群间方差值, δ_s^2 为种群内方差值(葛颂等, 1988)。基于14个性状数据, 参照罗建勋和顾万春(2005)对7个天然种群进行非加权组平均法(UPGMA)聚类分析, 性状与地理生态因子之间的相关关系研究采用Pearson系数分析法(辜云杰等, 2009)。运用独立样本 t 检验分别对山地与沙地的地理生态因子及长柄扁桃表型特征进行差异显著性检验。其中, 巢氏方差分析、多重比较、变异分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析均用

SPSS 19.0软件进行分析, 用Excel 2010处理其余常规分析。

2 结果和分析

2.1 种群间和种群内的表型变异

对长柄扁桃的14个表型性状在种群间和种群内层次上进行变异分析。由表2可知, 除了叶柄长和核纵径在种群间无显著差异外, 其他各参试性状在种群间和种群内均存在极显著差异($p < 0.01$)。通过分析表型性状的平均值(\bar{X})、标准偏差(SD)和多重比较(表3)可知, 长柄扁桃表型性状在种群间有显著差异: YYe种群的形状指数(本文将“叶形指数、果

表2 长柄扁桃表型性状的方差分析及种群间表型分化系数
Table 2 Variance analysis and phenotypic differentiation coefficients among the *Amygdalus pedunculata* populations sampled

性状 Trait	F值 F value		方差分量百分比 Proportion of variance components (%)			表型分化系数 Phenotypic differentiation coefficients (%)
	种群间 Among populations	种群内 Within population	种群间 Among populations	种群内 Within populations	随机误差 Random error	
叶长 LL (mm)	4.666**	6.281**	49.00	26.30	24.70	65.07
叶宽 LW (mm)	29.722**	5.621**	56.45	18.41	25.13	75.41
叶柄长 PL (mm)	1.720	3.357**	10.24	29.41	60.35	25.83
叶形指数 LSI	40.295**	9.621**	66.10	20.06	13.84	76.72
果纵径 FLD (mm)	3.615**	13.079**	37.08	44.79	18.13	45.29
果横径 FTD (mm)	6.278**	12.951**	24.19	56.28	19.53	30.06
果侧径 FSD (mm)	12.829**	14.658**	27.48	54.87	17.64	33.37
果形指数 FSI	16.351**	11.338**	42.86	37.14	20.00	53.58
果柄长 FSL (mm)	13.582**	9.379**	34.03	41.60	24.37	45.00
肉厚 PT (mm)	10.872**	5.169**	30.20	32.18	37.62	48.41
核纵径 NLD (mm)	1.576	18.788**	36.74	51.42	11.84	41.67
核横径 NTD (mm)	7.203**	9.344**	24.41	55.17	20.42	30.67
核侧径 NSD (mm)	6.471**	9.413**	16.62	60.42	22.96	21.57
核形指数 NSI	7.427**	5.599**	44.64	44.64	10.71	50.00
平均值 Mean value			35.72	40.91	23.37	45.90

FLD, fruit longitudinal diameter; FTD, fruit transverse diameter; FSD, fruit side diameter; FSI, fruit shape index; FSL, fruit stem length; LL, leaf length; LSI, leaf shape index; LW, leaf width; NLD, nutlet longitudinal diameter; NSD, nutlet side diameter; NSI, nutlet shape index; NTD, nutlet transverse diameter; PL, petiole length; PT, pulp thickness. **, $p < 0.01$.

形指数和核形指数”3个指数统称为形状指数)和核纵径都最大,SYe种群叶长最长,SSC种群果柄长最长、核侧径最大,LMD种群叶宽、果纵径、果横径、果侧径都最大,QD种群果肉最厚,XJG种群核横径最大。

2.2 种群间的表型分化

通过巢式方差分析,得到14个表型性状在种群间和种群内的方差分量百分比及表型分化系数(表2),结果显示其平均方差分量百分比分别为35.72%和40.91%,随机误差23.37%。种群间表型分化系数变幅为21.57%–76.72%,其中表型分化系数最大的是叶形指数,最小的是核侧径,表明叶在种群间分化较大,而核侧径相对稳定。叶长、叶宽、叶形指数和果形指数的表型分化系数均大于50%,说明这些性状在种群间的多样性比在种群内的丰富,核形指数的表型分化系数为50%,其余性状表型分化系数小于50%,在种群内的变异大于种群间。总之,长柄扁桃各性状的表型分化系数的均值为45.90%,即种群间变异在表型变异中贡献率为45.90%,种群内变异贡献率为54.10%,种群间的变异小于种群内,长柄扁桃天然种群的表型多样性主要源于种群内的变异。

2.3 表型性状变异特征

性状离散程度主要以变异系数来描述,变异系

数越大,表示性状离散程度越高,表型变异程度越大(杜荣骞, 2009)。对7个长柄扁桃天然种群进行变异系数分析(表4)得到14个表型性状的平均变异系数为15.72%,变幅9.39%–31.98%。其中变异系数最大的是肉厚性状,其次为果柄长(27.63%)和叶柄长(22.97%),核侧径的变异系数(9.39%)最小。7个天然种群表型性状平均变异系数为14.00%–19.02%,其中HJG种群表型多样性最丰富,QD种群和LMD种群表型多样性相对较低。

2.4 表型性状与地理生态因子的相关性

长柄扁桃14个表型性状与各种群地理生态因子的相关分析(表5)总结如下:年平均气温(10.003) > 纬度(9.701) > 无霜期(8.894) > 经度(5.827) > 年日照时间(5.165) > 海拔(5.019) > 年降水量(4.705)。其中,年平均气温与形状指标极显著正向相关($p < 0.01$),与叶宽极显著负向相关($p < 0.01$),与果柄长显著正向相关($p < 0.05$),与果侧径、核横径和核侧径显著负向相关($p < 0.05$); 纬度与叶宽极显著正向相关($p < 0.01$),与形状指数极显著负向相关($p < 0.01$),与果侧径、核横径和核侧径显著正向相关($p < 0.05$),与果柄长显著负向相关($p < 0.05$); 无霜期与果形指数极显著正向相关($p < 0.01$),与叶宽及核横径显著负向相关($p < 0.05$),与叶形指数及果柄长显著正向相关($p < 0.05$); 经度和核横径显著正向相关($p <$

表3 长柄扁桃7个种群的表型性状及多重比较(平均值±标准偏差)

Table 3 Phenotypic traits and multiple comparison of the seven *Amygdalus pedunculata* populations (mean ± SD)

性状 Trait	种群 Population						
	YYe	SYe	HJG	SSC	LMD	QD	XJG
LL (mm)	22.91 ± 4.43 ^c	24.65 ± 5.84 ^d	20.89 ± 3.89 ^{ab}	24.15 ± 3.47 ^{cd}	21.23 ± 1.99 ^b	19.58 ± 2.28 ^a	21.14 ± 3.172 ^b
LW (mm)	7.70 ± 1.97 ^a	8.19 ± 1.73 ^a	11.41 ± 2.34 ^b	13.09 ± 1.95 ^c	14.63 ± 2.34 ^d	13.75 ± 1.90 ^c	12.15 ± 2.49 ^b
PL (mm)	6.19 ± 1.50 ^{abc}	6.96 ± 1.52 ^d	5.95 ± 1.28 ^{ab}	6.54 ± 1.31 ^{cd}	5.77 ± 1.67 ^a	6.38 ± 1.52 ^{bc}	6.42 ± 1.31 ^{bc}
LSI	3.11 ± 0.85 ^c	3.06 ± 0.65 ^c	1.86 ± 0.30 ^b	1.86 ± 0.26 ^b	1.48 ± 0.21 ^a	1.44 ± 0.16 ^a	1.80 ± 0.38 ^b
FLD (mm)	12.81 ± 1.22 ^b	13.35 ± 1.29 ^c	11.79 ± 1.42 ^a	12.62 ± 1.43 ^b	13.59 ± 1.32 ^c	12.14 ± 0.97 ^a	12.74 ± 1.09 ^b
FTD (mm)	10.11 ± 0.89 ^a	11.32 ± 1.37 ^c	9.98 ± 1.56 ^a	11.00 ± 1.00 ^{bc}	12.55 ± 1.31 ^d	10.57 ± 1.03 ^b	11.06 ± 1.29 ^c
FSD (mm)	9.37 ± 0.85 ^a	10.07 ± 1.00 ^b	10.51 ± 1.47 ^{bc}	11.41 ± 0.90 ^d	12.49 ± 1.29 ^e	10.67 ± 1.07 ^c	11.48 ± 1.31 ^d
FSI	1.38 ± 0.16 ^b	1.34 ± 0.20 ^b	1.13 ± 0.14 ^a	1.11 ± 0.09 ^a	1.09 ± 0.09 ^a	1.14 ± 0.09 ^a	1.12 ± 0.12 ^a
FSL (mm)	6.19 ± 1.21 ^{cd}	6.46 ± 1.55 ^d	5.20 ± 1.66 ^b	5.80 ± 1.92 ^c	4.30 ± 1.11 ^a	4.05 ± 1.17 ^a	4.01 ± 1.21 ^a
PT (mm)	1.03 ± 0.35 ^{bc}	0.94 ± 0.10 ^{ab}	0.86 ± 0.38 ^a	1.16 ± 0.46 ^c	1.15 ± 0.41 ^c	1.46 ± 0.46 ^d	1.40 ± 0.41 ^d
NLD (mm)	11.88 ± 1.26 ^b	11.74 ± 0.91 ^b	11.03 ± 1.22 ^a	11.46 ± 1.38 ^a	11.13 ± 1.08 ^a	11.00 ± 1.16 ^a	11.64 ± 1.13 ^b
NTD (mm)	8.48 ± 1.12 ^a	8.98 ± 0.94 ^b	9.38 ± 0.97 ^{cd}	9.70 ± 0.72 ^{de}	9.55 ± 0.56 ^{de}	9.04 ± 0.95 ^{bc}	9.79 ± 0.94 ^e
NSD (mm)	7.47 ± 0.64 ^a	7.72 ± 0.89 ^{ab}	8.22 ± 1.07 ^c	8.70 ± 0.73 ^d	8.67 ± 0.48 ^d	7.85 ± 0.74 ^b	8.30 ± 0.78 ^c
NSI	1.60 ± 0.16 ^a	1.53 ± 0.12 ^a	1.37 ± 0.34 ^{bc}	1.32 ± 0.12 ^{ab}	1.28 ± 0.11 ^a	1.41 ± 0.13 ^c	1.41 ± 0.17 ^c

种群缩写及表型性状缩写分别见表1和表2。表中同列数字后的不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Table 1 and Table 2 indicated the numbers of populations and the abbreviations of phenotypic traits, respectively. Different letters after the number in the same column indicated significant difference at 0.05 level.

表4 长柄扁桃表型性状的变异系数
Table 4 Variance components of phenotypic traits in *Amygdalus pedunculata* populations

性状 Trait	种群 Population (%)							平均值 Mean value (%)
	YYe	SYe	HJG	SSC	LMD	QD	XJG	
LL	19.34	23.71	18.64	14.38	9.39	11.64	14.97	16.01
LW	25.53	21.16	20.52	14.92	15.99	13.85	20.53	18.93
PL	24.19	21.82	21.59	20.00	28.90	23.85	20.46	22.97
LSI	27.26	21.21	16.08	13.77	14.02	11.39	21.24	17.85
FLD	9.92	9.67	12.04	11.34	9.71	7.98	8.58	9.89
FTD	8.76	12.06	15.63	9.07	10.45	9.76	11.99	11.10
FSD	9.07	9.93	13.98	7.89	10.37	10.03	11.43	10.39
FSL	19.57	24.02	31.99	33.15	25.80	28.75	30.13	27.63
PT	33.74	10.41	43.75	39.65	35.41	31.45	29.44	31.98
FSI	11.76	14.61	12.69	7.92	8.57	7.51	10.78	10.55
NLD	10.59	7.77	11.08	12.02	9.67	10.50	9.73	10.19
NTD	13.26	10.49	10.30	7.46	5.86	10.56	9.61	9.65
NSD	8.55	11.51	12.97	8.43	5.55	9.37	9.36	9.39
NSI	10.25	7.80	24.96	9.36	8.52	9.41	11.86	11.74
Mean value	16.56	14.73	19.02	14.95	14.16	14.00	15.72	15.59

种群缩写及表型性状缩写分别见表1和表2。
Table 1 and Table 2 was indicated the numbers of populations and the abbreviations of phenotypic traits, respectively.

表5 长柄扁桃表型性状与地理生态因子间的相关分析
Table 5 Analysis of correlation between phenotypic traits and geo-ecological factors in *Amygdalus pedunculata* populations

性状 Trait	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)	年平均气温 AAT (°C)	年日照时间 AAS (h)	年降水量 AP (mm)	无霜期 Frost-free season (d)
LL	-0.344	-0.593	-0.439	0.661	-0.095	0.189	0.606
LW	0.455	0.910**	0.356	-0.958**	0.625	-0.426	-0.797*
PL	0.022	-0.365	0.134	0.513	-0.123	0.377	0.416
LSI	-0.521	-0.959**	-0.478	0.982**	-0.573	0.436	0.862*
FLD	0.001	-0.345	-0.851*	0.269	-0.399	0.537	0.336
FTD	0.292	0.229	-0.566	-0.281	-0.026	0.223	-0.123
FSD	0.594	0.779*	-0.075	-0.810*	0.336	-0.118	-0.707
FSL	-0.676	-0.787*	-0.347	0.842*	-0.119	-0.006	0.813*
PT	0.555	0.493	0.471	-0.566	0.149	0.243	-0.594
FSI	-0.600	-0.988**	-0.419	0.971**	-0.586	0.430	0.899**
NLD	-0.086	-0.729	-0.436	0.732	-0.610	0.721	0.494
NTD	0.778*	0.845*	0.187	-0.755*	0.337	-0.116	-0.801*
NSD	0.486	0.788*	0.043	-0.772*	0.531	-0.354	-0.706
NSI	-0.417	-0.893**	-0.218	0.889**	-0.656	0.529	0.739
Total	5.827	9.701	5.019	10.003	5.165	4.705	8.894

缩写同表1、表2。*与**分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 的显著水平。
Abbreviations see Table 1 and Table 2. * and ** indicate significant correlation at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively.

0.05); 海拔与果纵径显著负向相关($p < 0.05$)。年日照时间和年降水量与各性状无显著相关关系。

2.5 表型性状的主成分分析

通过主成分分析(表6), 统计前4个特征值大于1的主成分, 贡献率为95.518%。第一主成分(PC-1)主

要表征为形状指数, 包含叶宽、形状指数、果侧径、果柄长和核侧径等; 第二主成分(PC-2)主要表征为果性状, 包含果纵径和果横径; 第三主成分(PC-3)主要表征肉厚; 第四主成分(PC-4)主要表征叶柄。PC-1和PC-2的贡献率分别为58.329%和19.297%,

表6 长柄扁桃表型性状的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of phenotypic traits of *Amygdalus pedunculata* populations

性状 Trait	主成分 Main component			
	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4
LL	0.604	0.685	-0.266	0.263
LW	-0.976	-0.005	0.057	0.023
PL	0.499	0.289	0.271	0.689
LSI	0.974	0.198	-0.032	-0.060
FLD	0.113	0.854	0.321	-0.393
FTD	-0.453	0.773	0.250	-0.313
FSD	-0.896	0.433	0.042	-0.064
FSL	0.826	0.293	-0.430	0.086
PT	-0.500	-0.150	0.775	0.289
FSI	0.972	0.030	0.134	-0.184
NLD	0.751	0.410	0.244	0.174
NTD	-0.794	0.334	-0.160	0.376
NSD	-0.825	0.416	-0.326	0.134
NSI	0.937	-0.171	0.277	-0.049
特征值 Eigen value	8.166	2.699	1.387	1.120
贡献率 Contributive percentage (%)	58.329	19.279	9.909	8.001
累计贡献率 Total percentage (%)	58.329	77.608	87.517	95.518

表型性状缩写同表2。

Abbreviations of phenotypic traits was indicated in Table 2.

以PC-1为X轴、PC-2为Y轴制散点图(图1), 可知长柄扁桃表型性状受地理分布影响较大, 且形状指数(PC-1)所受影响大于果性状(PC-2)。种群不同, 受地理生态因子的影响程度不同, YYe种群和SYe种群的形状指数、QD种群和HJG种群的果性状受地理因子影响最大, XJG种群表型性状受地理生态因子影响相对较小。

2.6 种群聚类分析及不同立地条件下的长柄扁桃表型变异

对7个种群进行UPGMA聚类分析(图2), 基于表型性状将种群划分为两大类, 第一大类包括HJG、XJG、QD、LMD和SSC, 主要立地为山地; 第二大类包括YYe和SYe, 主要立地为沙地。通过比较山地、沙地这两种不同立地条件下生长的长柄扁桃表型性状(表7), 可知立地条件对长柄扁桃不同表型性状具有不同程度的影响, 其中, 对叶长、叶宽、叶形指数、果侧径、果柄长、肉厚、果形指数、核横径、核侧径及核形指数等性状的影响较大。相对于山地上生长的长柄扁桃, 沙地的长柄扁桃叶更长更窄、叶形指数更大, 山地的长柄扁桃叶形为近圆形

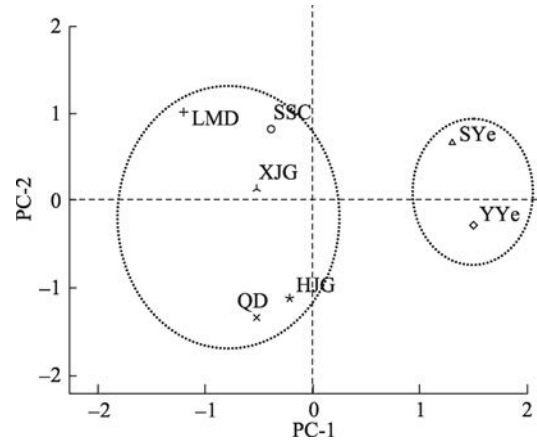


图1 基于表型性状(PC-1, PC-2)的长柄扁桃种群关系。种群缩写见表1。

Fig. 1 The relationship among different *Amygdalus pedunculata* populations based on PC-1 and PC-2. Table 1 indicated the numbers of populations.

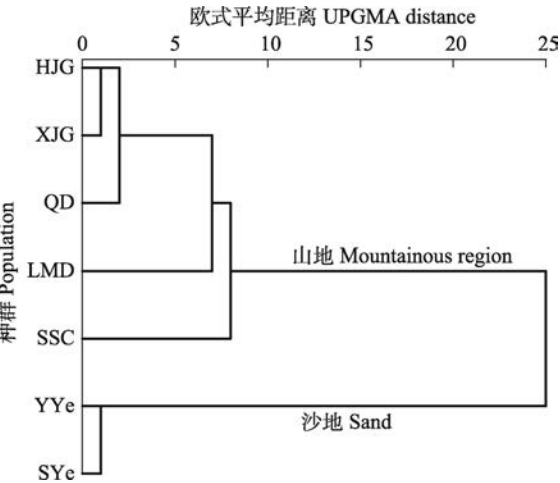


图2 基于表型性状的长柄扁桃种群聚类分析。种群缩写见表1。

Fig. 2 Cluster analysis based on the phenotypic traits of *Amygdalus pedunculata* populations. Table 1 indicated the numbers of populations.

至长圆形, 而沙地的多为长椭圆形或卵状披针形(图3); 沙地的长柄扁桃的果纵径、果柄、果形指数都大于山地的长柄扁桃, 果横径小于山地的长柄扁桃, 沙地的果实多为卵球形, 而山地的果实多为近球形, 沙地的长柄扁桃果柄普遍长于山地(图4); 沙地的长柄扁桃核横径和核侧径均小于山地的长柄扁桃, 核形指数大于山地的长柄扁桃, 沙地的长柄扁桃核近宽卵形, 山地的长柄扁桃核近宽卵形至近球形。不同立地的长柄扁桃表型特征差异对比见表8。

对不同立地条件各地理生态因子进行差异显著性检验(表9), 发现年平均气温和无霜期差异均极显著($p < 0.01$), 纬度差异显著($p < 0.05$), 表明年平

表7 不同立地对长柄扁桃表型的影响
Table 7 The influence of different stands on *Amygdalus pedunculata* populations

性状 Trait	山地 Mountainous region			沙地 Sand			t检验 t-test
	分布范围 Rangeability	均值 Mean value	标准偏差 Standard deviation	分布范围 Rangeability	均值 Mean value	标准偏差 Standard deviation	
LL (mm)	9.21–33.19	20.75	4.04	12.16–38.91	23.45	4.96	**
LW (mm)	5.21–19.52	12.01	2.61	4.23–13.95	7.85	1.90	**
PL (mm)	2.68–12.22	6.28	1.43	2.87–10.44	6.44	1.57	—
LSI	0.84–3.23	1.77	0.35	1.96–5.93	3.08	0.72	**
FLD (mm)	7.14–19.22	12.65	1.45	9.75–16.21	12.98	1.26	*
FTD (mm)	5.58–14.77	10.68	1.39	8.30–14.65	10.49	1.19	—
FSD (mm)	5.92–15.73	11.20	1.33	7.24–12.06	9.59	0.95	**
FSL (mm)	1.16–10.15	4.47	1.54	3.08–10.07	6.27	1.32	**
PT (mm)	0.15–2.99	1.23	0.47	0.38–2.21	1.00	0.30	**
FSI	0.75–1.66	1.14	0.14	0.94–1.82	1.36	0.17	**
NLD (mm)	7.28–18.15	11.61	1.44	9.89–15.27	11.84	1.16	—
NTD (mm)	7.04–13.45	9.67	0.97	5.82–10.97	8.64	1.09	**
NSD (mm)	2.48–11.93	8.27	0.85	6.09–9.64	7.54	0.73	**
NSI	0.81–4.06	1.42	0.25	1.23–2.01	1.58	0.15	**

表型性状缩写同表2。*与**分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 的显著水平。
Abbreviations of phenotypic traits was indicated in Table 2. * and ** indicate significant correlation at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively.

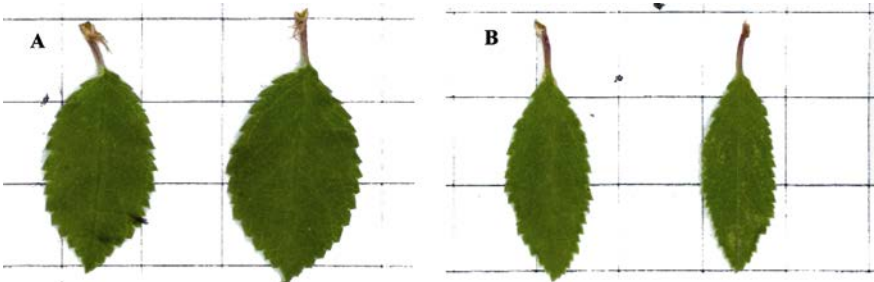


图3 不同立地下长柄扁桃叶片形态变异。A, 山地。B, 沙地。网格大小为1 cm × 1 cm。
Fig. 3 The phenotype difference of leaves in *Amygdalus pedunculata* between different stands. A, Mountainous region. B, Sand. The size of the grid was 1 cm × 1 cm.

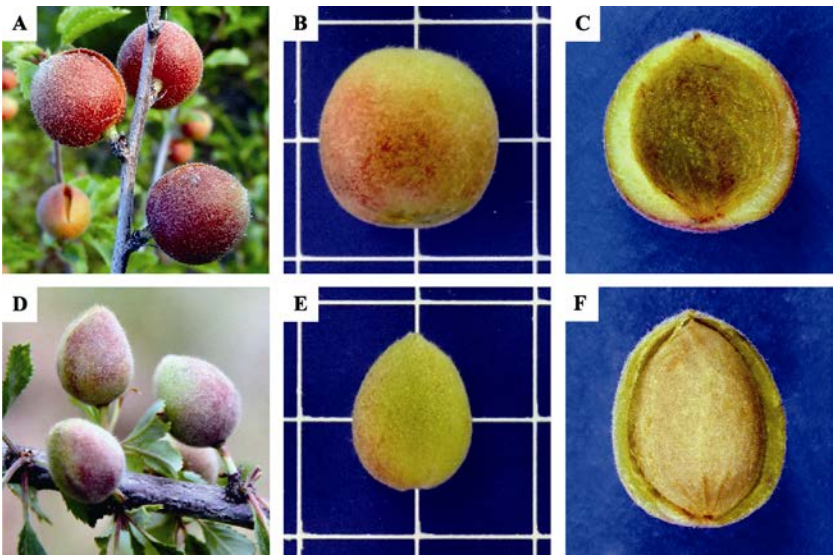


图4 不同立地下长柄扁桃果实形态变异。A, 山地果枝。B, 山地果实。C, 山地果肉。D, 沙地果枝。E, 沙地果实。F, 沙地果肉。网格大小为1 cm × 1 cm。
Fig. 4 The phenotype difference of fruits in *Amygdalus pedunculata* between different stands. A, Fruit spur from mountainous region. B, Fruit from mountainous region. C, Pulp from mountainous region. D, Fruit spur from sand. E, Fruit from sand. F, Pulp from sand. The size of the grid was 1 cm × 1 cm.

doi: 10.17521/cjpe.2017.0104

表8 不同立地长柄扁桃形态特征对比

Table 8 Comparisons of morphological characteristics of *Amygdalus pedunculata* populations between different sites

	山地 Mountainous region	沙地 Sand
叶片形态 Leaf morphology	叶片近圆形至长圆形, 长9.21–33.19 mm, 宽5.21–19.52 mm; 叶柄长2.68–12.22 mm。 Blade rotund to oblong, 9.21–33.19 mm long, 5.21–19.52 mm wide; petioles 2.68–12.22 mm long.	叶长椭圆形或卵状披针形, 长12.16–38.91 mm, 宽4.23–13.95 mm; 叶柄长2.87–10.44 mm。 Blade long oval to ovate-lanceolate, 12.16–38.91 mm long, 4.23–13.95 mm wide; petioles 2.87–10.44 mm long.
果实形态 Fruit morphology	果实近球形, 直径5.92–15.73 mm; 果柄较短, 长1.16–10.15 mm; 果肉较厚, 0.15–2.99 mm。 Fruit subglobose, 5.92–15.73 mm in diameter; fruit stem short, 1.16–10.15 mm; pulp thick, 0.15–2.99 mm.	果实卵球形, 直径7.24–12.06 mm; 果柄较长, 长3.08–10.07 mm; 果肉较薄, 0.38–2.21 mm。 Fruit ovoid, 7.24–12.06 mm in diameter; fruit stem long, 3.08–10.07 mm; pulp thin, 0.38–2.21 mm.
核形态 Stone form	核宽卵形至近球形, 直径2.48–11.93 mm。 Stone wide oval to subglobose, 2.48–11.93 mm in diameter.	核宽卵形, 直径6.09–9.64 mm。 Stone wide oval to subglobose, 6.09–9.64 mm in diameter.

表9 不同立地各地理生态因子的比较分析

Table 9 Comparisons on geographical and ecological factors between different sites

地理生态因子 Geo-ecological factor	山地 Mountainous region		沙地 Sand		t检验 t-test
	均值 Mean value	标准偏差 Standard deviation	均值 Mean value	标准偏差 Standard deviation	
经度 Longitude (E)	110.48	0.76	109.535	0.47	—
纬度 Latitude (N)	40.81	0.10	38.65	0.28	*
海拔 Altitude (m)	1 394.00	107.60	1 281.00	18.38	—
年平均气温 AAT (°C)	3.78	0.52	8.45	0.49	**
年日照时间 AAS (h)	2 974.80	78.85	2 877.50	2.12	—
年降水量 AP (mm)	352.58	82.62	425.25	16.05	—
无霜期 Frost-free season (d)	113.80	10.64	161.50	10.60	**

AAT、AAS和AP同表1。*与**分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 的显著水平。

AAT, AAS, AP see Table 1. * and ** indicate significant correlation at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively.

均气温、无霜期是不同立地长柄扁桃表型差异的主要影响因子。

3 讨论

3.1 长柄扁桃不同种群表型变异来源

长柄扁桃在我国主要分布于内蒙古、陕西等沙漠、沙地及石质化山区。通过对分布区7个长柄扁桃天然种群的14个表型性状的研究,发现长柄扁桃表型多样性在种群间和种群内均较丰富,这与尹明宇等(2016)对山杏(*Armeniaca sibirica*)、冯秋红等(2017)对岷江柏(*Cupressus chengiana*)、孟超等(2013)对葛萝槭的研究结果类似。表型分化系数是长柄扁桃对环境适应性的客观反映,该研究中长柄扁桃种群平均表型分化系数为45.90%,高于脱皮榆(28.10%) (郑昕等, 2013)、云杉(*Picea asperata*)(30.99%)(罗建勋和顾万春, 2005)、板栗(23.42%)(江锡兵等, 2014)、核桃(30.60%)(徐永杰等, 2016)、砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)(39.25%)(林玲等, 2014),与紫丁香(*Syringa oblata*)(43.93%)(明军和顾万春, 2006)相当,低于葛萝槭(50.16%)(孟超等, 2013)、油松(*Pinus tabulaeformis*)(51.86%)(刘永红等, 2010),长柄扁桃种群间表型分化值属中上水平。本研究选取的7个长

柄扁桃种群具有明显的片段化分布特征,造成不同种群表型变异丰富。长柄扁桃天然种群表型变异主要源自种群内,一方面反映了它对环境压的广泛适应性(李斌等, 2002);另一方面可能与长柄扁桃种子无休眠性有关(郭春会等, 2005),只要给予适宜的温度和湿度,长柄扁桃种子就能萌发,但它的自然生长环境非常恶劣,出芽后环境的突变导致大量幼苗死亡,在自然状态下个体萌发整齐性差,成苗率低,个体发育不一致,差异较大,故而种群内的变异高于种群间的变异。植物种群遗传结构主要受交配系统和基因流相互作用(Hamrick & Godt, 1990)。长柄扁桃天然种群存在天然杂交以及不同地域间相互引种,果实成熟时果肉自然裂开、种子相对较小等特点都有利于种子传播从而促进不同种群间的基因交流,减少了种群间的遗传分化。

3.2 长柄扁桃种群的表型变异特征

变异系数是描述性状离散程度的量,与表型多样性正相关。长柄扁桃叶、果、核性状平均变异系数排序如下:叶(18.94%) >果(16.92%) >核(10.24%)。叶性状指标的变异系数是核性状指标变异系数的1.85倍,这表明长柄扁桃核性状的遗传稳定性明显高于叶性状,叶片受环境条件影响较大。长柄扁桃

叶片变异系数较大可能与经度和纬度及生长土质有关, YYe的经度(109.20°)和纬度(38.45°)都低于其他种群, 生长于沙地, 其形态表现出叶片长窄, 叶柄较长, 果侧径偏小, 果柄较长等特性, 这与球果类更大的种子产生更大的种翅以增强扩散能力相类似(Gil *et al.*, 2002)。LMD种群的果核普遍大于其他种群。表征长柄扁桃形状指标的变异系数均值为13.38%, 表征叶、果、核大小的变异系数均值为16.19%, 说明不同环境条件下, 长柄扁桃叶、果、核大小差异丰富, 而叶形、果形、核形差异较小, 这与对山杏表型性状研究的结果(尹明宇等, 2016)相似。研究长柄扁桃天然种群表型变异特征可为其野生资源收集、良种选育等工作提供参考。

3.3 长柄扁桃种群的表型性状与地理生态因子及立地的相关性

7个研究种群分布于我国内蒙古、陕西境内, 气候干旱, 立地类型分山地和沙地, 纬度范围38.45°–40.98° N, 经度范围109.20°–111.83° E, 海拔处于1 222–1 516 m, 这些地理生态环境因子的差异是引起长柄扁桃表型性状多样性的外在原因。本研究中除年日照时间和年降水量对长柄扁桃表型性状没有显著影响外, 其他5个因子影响显著或极显著。其中, 年平均气温对长柄扁桃表型性状的综合影响居首位, 年平均气温越高, 叶形越细长, 近似长椭圆形或卵状披针形, 果柄越长, 果、核更接近长圆形; 年平均气温越低, 叶越宽, 叶形指数越小, 叶更近扁圆形。这是由于温度越大, 蒸腾速率越快, 叶片变细长以减少蒸腾面积而有利于自身生长。随着纬度的增加, 核纵径、果柄长和形状指数减小, 叶宽、果肉厚度、果侧径、核横径、核侧径均增大; 由南而北, 叶从细长形趋近扁圆形, 果、核从近长圆形趋近于圆形, 果柄变短, 果肉变厚。随着无霜期的加长, 叶宽、核横径增大。随着经度的增加, 种实形状指数减小, 果侧径、核横径、核侧径增大。高海拔种实纵径小于低海拔地区, 果形越趋近于圆形。年日照时间和年降水量对各性状的相关关系都无显著作用。植物形态特征变异通常具有适应意义, 植物种群与地理相互作用的规律比较复杂, 不同物种表现不同, 如山杏呈现出以经度、年降水量和年日照时间为主的变化规律(尹明宇等, 2016), 南方皂荚则呈现出荚果以南北变异为主、种子以东西变异为主的复杂变异模式(李伟等, 2013), 而长柄扁桃种群表型变异主要受

年平均气温、纬度和无霜期3个主要地理气候因子影响。

通过主成分分析和聚类分析, 7个长柄扁桃天然种群可分为两大类, 第一大类为HJG、XJG、QD、LMD和SSC种群, 均生长于内蒙古境内的山地, 具有相同的大气候条件, 年平均气温和纬度相差不大。第二大类为YYe和SYe, 都位于陕西境内, 生长于沙地, 各地理气候影响因子近似度都大于其他种群。立地条件对叶长、叶宽、叶形指数、果纵径、果侧径、果柄长、核横径、核侧径等表型性状影响较大。山地的长柄扁桃叶大多为近圆形至长圆形, 而沙地的长柄扁桃多为长椭圆形或卵状披针形; 山地的长柄扁桃果、核形状为近球形, 而沙地的长柄扁桃果、核大多呈卵球形; 沙地的长柄扁桃的果柄普遍长于山地的长柄扁桃。长柄扁桃各表型性状与地理生态气候因子具有密切关联, 因此在区划长柄扁桃种群表型时可将地理区划作为参考依据。进一步探究表型多样性和地理生态因子之间的联系, 应扩大采样地和采样量以及增加质量和大小性状指标研究, 采用更系统更科学的研究方法, 使结论更精确。

3.4 长柄扁桃种质资源的保育和利用

长柄扁桃具有耐寒抗旱、耐贫瘠、防风固沙等特性, 具有极强的适应力, 在我国干旱半干旱地区生态防治建设中发挥着巨大的作用。其种仁中不饱和脂肪酸、蛋白质、维生素和矿物质等营养成分含量丰富, 具有良好的生态、经济和药用等综合价值。近年来, 因沙漠风蚀和人为等原因, 长柄扁桃种质资源分布零散且面临衰亡威胁(刘孟军, 1998), 已被列为二级濒危植物(李登武等, 2004)。为了充分保护和利用现有长柄扁桃天然资源, 有效地进行遗传改良、培育优质稳定高产新品种, 建议如下: (1)加强保护现有野生种群, 充分发挥其在原产地的生态经济综合效益; (2)开展生态遗传学研究, 分析遗传多样性, 将形态学、分子标记和地理生态结合分析种群遗传多样性和导致长柄扁桃濒危的关键因子及其濒危过程, 以有效地确定保存策略; (3)长柄扁桃表型变异主要来源于种群内, 且主要与年平均气温、纬度和无霜期相关, 尽可能丰富这些因子的采样范围, 增加采样数和评测指标, 以使研究更全面, 更有效地进行长柄扁桃的保护和利用工作; (4)虽然长柄扁桃表型变异主要来源于种群内, 但仍然有将近一小

半来自于种群间,故长柄扁桃的遗传改良工作可以在种群间和种群内两个层次上开展,将种源选择和优良单株选择相结合,选择最优母树亲本营建母树林或种子园,以此来满足综合生态经济人工林发展的用种需求,还可有效地避免采种对现有遗传资源的破坏。

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2017ZA004-7)。

参考文献

- Deng LL, Sun Q, Xu YL, Zhou L, Xu Y, Li DL, Luo Y, Chen S, Li GQ, Cai NH (2016). Compare on the needle phenotypic variations between the different type of trunk populations of *Pinus yunnanensis*. *Journal of Southwest Forestry University*, 36(3), 30–37. (in Chinese with English abstract) [邓丽丽, 孙琪, 许玉兰, 周丽, 徐杨, 李德龙, 罗元, 陈诗, 李根前, 蔡年辉 (2016). 云南松不同茎干类型群体针叶性状表型多样性比较. 西南林业大学学报, 36(3), 30–37.]
- Du RQ (2009). *Biostatistics*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [杜荣骞 (2009). 生物统计学. 高等教育出版社, 北京.]
- Feng QH, Shi ZM, Xu ZJR, Miao N, Tang JC, Liu XL, Zhang L (2017). Phenotypic variations in cones and seeds of natural *Cupressus chengiana* populations in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 748–756. (in Chinese with English abstract) [冯秋红, 史作民, 徐峥静茹, 缪宁, 唐敬超, 刘兴良, 张雷 (2017). 岷江柏天然种群种实表型变异特征. 应用生态学报, 28, 748–756.]
- García D, Zamora R, Gómez JM (2000). Geographical variation in seed production, predation and abortion in *Juniperus communis* throughout its range in Europe. *Journal of Ecology*, 88, 435–446.
- Ge S, Wang MX, Chen YW (1988). An analysis of population genetic structure of masson pine by isozyme technique. *Scientia Silvae Sinicae*, 24, 399–410. (in Chinese with English abstract) [葛颂, 王明麻, 陈岳武 (1988). 用同工酶研究马尾松群体的遗传结构. 林业科学, 24, 399–410.]
- Gil L, Climent J, Nanos N, Mutke S, Ortiz I, Schiller G (2002). Cone morphology variation in *Pinus canariensis* Sm. *Plant Systematics and Evolution*, 235, 35–51.
- Gu WC (2004). *Statistical Genetics*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [顾万春 (2004). 统计遗传学. 科学出版社, 北京.]
- Gu YJ, Luo JX, Wu YW, Cao XJ (2009). Phenotypic diversity in natural populations of *Picea balfouriana* in Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 291–301. (in Chinese with English abstract) [辜云杰, 罗建勋, 吴远伟, 曾小军 (2009). 川西云杉天然种群表型多样性. 植物生态学报, 33, 291–301.]
- Guo CH, Luo M, Ma YH, Ma XW (2005). Study on the salt tolerance of three woody ground cover plants. *Journal of Northwest A & F University (Natural Sciences Edition)*, 33(12), 125–129. (in Chinese with English abstract) [郭春会, 罗梦, 马玉华, 马小卫 (2005). 沙地濒危植物长柄扁桃特性研究进展. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 33(12), 125–129.]
- Guo GG, Feng B, Ma BL, Jing ZB, Zhang YL, Guo CH (2013a). Studies on drought resistance of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall. *Plant Science Journal*, 31, 360–369. (in Chinese with English abstract) [郭改改, 封斌, 麻保林, 井赵斌, 张应龙, 郭春会 (2013a). 不同区域长柄扁桃抗旱性的研究. 植物科学学报, 31, 360–369.]
- Guo GG, Wei Y, Feng B, Ma BL, Zhang YL, Guo CH (2013b). Gold-resistance of *Amygdalus pedunculata* Pall from different provenances in China. *Journal of Northwest Forestry University*, 28(4), 11–15. (in Chinese with English abstract) [郭改改, 魏钰, 封斌, 麻保林, 张应龙, 郭春会 (2013b). 我国几个不同地域长梗扁桃苗木的抗寒性研究. 西北林学院学报, 28(4), 11–15.]
- Hamrick JL, Godt MJW (1990). Allozyme diversity in plant species. In: Brown HD, Clegg MT, Kahler AL, Weir BS eds. *Plant Population Genetics, Breeding, and Genetic Resources*. Sinauer Associates, Sunderland, USA. 43–63.
- Huang DJ, Feng G, Liu JH, Wang ZB (2016). Study on samara phenotypic variation of *Acer palmatum*. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 28(5), 36–41. (in Chinese with English abstract) [黄东静, 冯刚, 刘继虎, 万志兵 (2016). 鸡爪槭翅果表型性状变异. 黑龙江八一农垦大学学报, 28(5), 36–41.]
- Hou GF, Li C, Chen B, Shen YH, Qian ZJ, Zhang YL (2014). Composition analysis of *Amygdalus pedunculata* Pall seed from different regions. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 34, 1843–1848. (in Chinese with English abstract) [侯国峰, 李聪, 陈邦, 申烨华, 钱振杰, 张应龙 (2014). 不同产地长柄扁桃种仁成分分析. 西北植物学报, 34, 1843–1848.]
- Ji ZL, Qian AD (1981). *Amygdalus pedunculata* Pall and *A. mongolia* Maxim natural distribution area in China. *China Fruits*, (2), 38–39. (in Chinese) [姬钟亮, 钱安东 (1981). 长柄扁桃和蒙古扁桃在我国自然分布区的调查. 中国果树, (2), 38–39.]
- Jiang B, Guo CH, Mei LX, Shen YH, Wang YJ (2008). Studies on cold-resistance of sand *Amygdalus pedunculata* Pall. *Journal of Northwest A & F University (Natural Sciences Edition)*, 36 (5), 92–96. (in Chinese with English abstract) [蒋宝, 郭春会, 梅立新, 申烨华, 王亚俊 (2008). 沙地植物长柄扁桃抗寒性的研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 36(5), 92–96.]

- Jiang XB, Gong BC, Liu QZ, Chen X, Wu KY, Deng QE, Tang D (2014). Phenotypic diversity of important agronomic traits of local cultivars of Chinese chestnut. *Acta Horticulturae Sinica*, 41, 641–652. (in Chinese with English abstract) [江锡兵, 龚榜初, 刘庆忠, 陈新, 吴开云, 邓全恩, 汤丹 (2014). 中国板栗地方品种重要农艺性状的表型多样性. 园艺学报, 41, 641–652.]
- Jiang ZM, Wuyun TN, Wang S, Zhu XC (2016). Amino acid composition and nutritional quality evaluation of wild *Amygdalus pedunculatus* Pall. kernels from different growing regions. *Food Science*, 37(4), 77–82. (in Chinese with English abstract) [姜仲茂, 乌云塔娜, 王森, 朱绪春 (2016). 不同产地野生长柄扁桃仁氨基酸组成及营养价值评价. 食品科学, 37(4), 77–82.]
- Li B, Gu WC, Lu BM (2002). A study on phenotypic diversity of seeds and cones characteristics in *Pinus bungeana*. *Biodiversity Science*, 10, 181–188. (in Chinese with English abstract) [李斌, 顾万春, 卢宝明 (2002). 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究. 生物多样性, 10, 181–188.]
- Li B, Li Y, Xu NX, Zhang C, Shen YH, Zhang YL (2010). Preparation of activated carbon from amygdalus shell with zinc chloride. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 40, 806–810. (in Chinese with English abstract) [李冰, 李洋, 许宁侠, 张弛, 申烨华, 张应龙 (2010). 氯化锌活化法制备长柄扁桃壳活性炭. 西北大学学报(自然科学版), 40, 806–810.]
- Li C, Li GP, Chen Q, Bai B, Shen YH, Zhang YL (2010). Fatty acid composition analysis of the seed oil of *Amygdalus pedunculatus* Pall. *China Oils and Fats*, 35(4), 77–79. (in Chinese with English abstract) [李聪, 李国平, 陈俏, 白斌, 申烨华, 张应龙 (2010). 长柄扁桃油脂脂肪酸成分分析. 中国油脂, 35(4), 77–79.]
- Li DW, Dang KL, Wen ZM (2004). Research of rare and endangered plants of seed plant flora in Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 24, 2321–2328. (in Chinese with English abstract) [李登武, 党坤良, 温仲明 (2004). 黄土高原地区种子植物区系中的珍稀濒危植物研究. 西北植物学报, 24, 2321–2328.]
- Li W, Lin FR, Zheng YQ, Li B (2013). Phenotypic diversity of pods and seeds in natural populations of *Gleditsia sinensis* in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 61–69. (in Chinese with English abstract) [李伟, 林富荣, 郑勇奇, 李斌 (2013). 皂荚南方天然群体种实表型多样性. 植物生态学报, 37, 61–69.]
- Lin L, Wang JH, Luo J, Chen S (2014). Phenotypic diversity of seed and fruit traits in natural populations of *Sophora moorcroftiana*. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(4), 137–143. (in Chinese with English abstract) [林玲, 王军辉, 罗建, 陈帅 (2014). 砂生槐天然群体种实性状的表型多样性. 林业科学, 50(4), 137–143.]
- Liu MJ (1998). *Wild Fruits of China*. China Agricultural Press, Beijing. 1–8. (in Chinese) [刘孟军 (1998). 中国野生果树. 中国农业出版社, 北京. 1–8.]
- Liu YH, Gao GQ, Cui W, Cheng CH, Yang PH, Fan JF (2010). Study on phenotypic diversity of seeds and cones characteristics in *Pinus tabulaeformis* Carr. *Seed*, 29(9), 44–48. (in Chinese with English abstract) [刘永红, 高桂琴, 崔鬼, 程春红, 杨培华, 樊军锋 (2010). 油松天然群体种实性状表型多样性分析. 种子, 29(9), 44–48.]
- Luo JX, Gu WC (2005). Study on phenotypic diversity of natural population in *Picea asperata*. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(2), 66–73. (in Chinese with English abstract) [罗建勋, 顾万春 (2005). 云杉天然群体表型多样性研究. 林业科学, 41(2), 66–73.]
- Meng C, Zheng X, Ji ZF, Lin LL, Zhang CQ, Wang YL (2013). Phenotypic diversity of natural populations of *Acer grosseri* in Shanxi. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 33, 2232–2240. (in Chinese with English abstract) [孟超, 郑昕, 姬志峰, 林丽丽, 张翠琴, 王祎玲 (2013). 山西葛萝槭天然种群表型多样性研究. 西北植物学报, 33, 2232–2240.]
- Ming J, Gu WC (2006). Phenotypic variation of *Syringa oblata* Lindl. *Forest Research*, 19, 199–204. (in Chinese with English abstract) [明军, 顾万春 (2006). 紫丁香表型多样性研究. 林业科学研究, 19, 199–204.]
- Pigliucci M, Murren CJ, Schlichting CD (2006). Phenotypic plasticity and evolution by genetic assimilation. *Journal of Experimental Biology*, 209, 2362–2367.
- Su GX, Yao YQ (1983). Wild almond resources of China. *Study on Wild Plant*, (2), 7–11. (in Chinese) [苏贵兴, 姚玉卿 (1983). 我国的野生扁桃资源. 野生植物研究, (2), 7–11.]
- Su YX, Zhang X, Wang WL, Zhao YY, Wang YH, Shen SK (2017). Phenotypic diversity of *Rhododendron rubiginosum* populations at different altitudes. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 37, 356–362. (in Chinese with English abstract) [苏应雄, 张雪, 王文礼, 赵云勇, 王跃华, 申仕康 (2017). 红棕杜鹃不同海拔种群的表型多样性研究. 西北植物学报, 37, 356–362.]
- Via S (1993). Adaptive phenotypic plasticity: Target or by-product of selection in a variable environment? *The American Naturalist*, 142, 352–365.
- Wang W, Chu JM, Tang XQ, Li YF, Xu XQ (2014). Morphological diversity and correlativity analysis of nut traits of *Amygdalus pedunculata*. *Forest Research*, 27, 854–859. (in Chinese with English abstract) [王伟, 褚建民, 唐晓倩, 李毅夫, 许新桥 (2014). 长柄扁桃坚果表型多样性及其相关关系研究. 林业科学研究, 27, 854–859.]
- Wang YL, Li YH, Wang Y, Zhu Q, Wang L (2012). Analysis of nutritional components of three kind of *Amygdalus* plant. *Guangdong Agricultural Sciences*, 39(7), 127–129. (in Chinese with English abstract) [王娅丽, 李永华, 王钰, 朱强, 王丽 (2012). 3种扁桃属植物营养成分分析.

- 广东农业科学, 39(7), 127–129.]
- Wang ZH, Zhang EJ (2001). *Chinese Fruit Tree, Amygdalus*. China Forestry Publishing House, Beijing. 80–110. (in Chinese) [汪祖华, 庄恩及 (2001). 中国果树志, 桃卷. 中国林业出版社, 北京. 80–110.]
- Xu JJ, Su YQ, Zhang Q, Guo CH, Xue G, Yuquan XYL (2011). Process of the extraction of *Amygdalus pedunculata* pall. oil. *Journal of Northwest Forestry University*, 26(4), 184–187. (in Chinese with English abstract) [徐金娟, 苏印泉, 张强, 郭春会, 薛刚, 玉泉幸一郎 (2011). 溶剂法提取长柄扁桃油的工艺研究. 西北林学院学报, 26(4), 184–187.]
- Xu L (2014). *Study on Preparation of Lube Base Oil from the Desert Amygdalus pedunculata Pall. Oil*. Master degree dissertation, Northwest University, Xi'an. (in Chinese with English abstract) [许龙 (2014). 沙生植物长柄扁桃油改性制备润滑油基础油的研究. 硕士学位论文, 西北大学, 西安.]
- Xu XQ, Wang W, Chu JM (2015). Variation analysis on kernel oil content and its fatty acid composition in 31 superior *Amygdalus pedunculata* individuals form Mu Us Desert. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(7), 142–147. (in Chinese with English abstract) [许新桥, 王伟, 褚建民 (2015). 毛乌素沙地长柄扁桃31个优良单株坚果核仁脂肪酸组成变异分析. 林业科学, 51(7), 142–147.]
- Xu Y, Zhou L, Cai NH, Deng LL, Wang DW, Duan AA, He CZ, Xu YL (2016). Needle phenotypic variation among populations of *Pinus yunnanensis* at different altitude. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 31(1), 109–114. (in Chinese with English abstract) [徐杨, 周丽, 蔡年辉, 邓丽丽, 王大伟, 段安安, 何承忠, 许玉兰 (2016). 云南松不同海拔群体的针叶性状表型多样性研究. 云南农业大学学报: 自然科学, 31(1), 109–114.]
- Xu YJ, Han HB, Wang H, Chen LN, Ma QG, Pei D (2016). Phenotypic and genetic diversities of nuts of walnut (*Juglans regia*) populations originated from seedlings in Daba Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(5), 111–117. (in Chinese with English abstract) [徐永杰, 韩华柏, 王滑, 陈凌娜, 马庆国, 裴东 (2016). 大巴山区核桃实生居群的坚果表型和遗传多样性. 林业科学, 52(5), 111–117.]
- Yin MY, Jiang ZM, Zhu XC, Bao WQ, Zhao H, Wuyun T (2016). High-level phenotypic variations in populations of siberian apricot (*Armeniaca sibirica*) in Nei Mongol. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1090–1099. (in Chinese with English abstract) [尹明宇, 姜仲茂, 朱绪春, 包文泉, 赵罕, 乌云塔娜 (2016). 内蒙古山杏种群表型变异. 植物生态学报, 40, 1090–1099.]
- Zhang DH (2009). *Descriptors and Data Standard for Almond (Amygdalus)*. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [张大海 (2009). 扁桃种质资源描述规范和数据标准. 中国农业出版社, 北京.]
- Zhang P, Shen YH, Guo CH, Kong XH, He XW, Wang JW (2004). HPLC determination of α -tocopherol in almond kernel. *Food Science*, 25(1), 142–144. (in Chinese with English abstract) [张萍, 申烨华, 郭春会, 孔祥宏, 何学文, 王继武 (2004). 扁桃种仁中维生素E的高效液相色谱法测定. 食品科学, 25(1), 142–144.]
- Zhang Y, Cao YF, Huo HL, Tian LM, Dong XG, Qi D, Zhang XB (2016). Research on diversity of pear germplasm resources based on flowers phenotype traits. *Acta Horticulturae Sinica*, 43, 1245–1256. (in Chinese with English abstract) [张莹, 曹玉芬, 霍宏亮, 田路明, 董星光, 齐丹, 张小双 (2016). 基于花表型性状的梨种质资源多样性研究. 园艺学报, 43, 1245–1256.]
- Zhao ZY (1992). *Rare and Endangered Plants in Inner Mongolia*. China Agriculture Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [赵一之 (1992). 内蒙古珍稀濒危植物图谱. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Zheng X, Meng C, Ji ZF, Wang YL (2013). Phenotypic diversity of leaves morphologic characteristics of *Ulmus lamellosa* natural populations in Shanxi. *Acta Horticulturae Sinica*, 40, 1951–1960. (in Chinese with English abstract) [郑昕, 孟超, 姬志峰, 王玮玲 (2013). 脱皮榆山西天然居群叶性状表型多样性研究. 园艺学报, 40, 1951–1960.]
- Zuo SY, Wuyun T, Zhu XC, Du XL (2015). Diversity of leaves phenotype traits of endangered and wild species *Amygdalus pedunculata*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 35(11), 60–67. (in Chinese with English abstract) [左丝雨, 乌云塔娜, 朱绪春, 杜笑林 (2015). 濒危野生长柄扁桃叶片表型性状的多样性. 中南林业科技大学学报, 35(11), 60–67.]

责任编辑: 王根轩 责任编辑: 李 敏



扫码向作者提问