

DOI: 10.5846/stxb201404010613

张翠琴, 姬志峰, 林丽丽, 赵瑞华, 王祎玲. 五角枫种群表型多样性研究. 生态学报, 2015, 35(16): - .

Zhang C Q, Ji Z F, Lin L L, Zhao R H, Wang Y L. Phenotypic Diversity of *Acer mono* Maxim Population. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): - .

## 五角枫种群表型多样性研究

张翠琴, 姬志峰, 林丽丽, 赵瑞华, 王祎玲\*

山西师范大学生命科学学院, 临汾 041004

**摘要:**为揭示五角枫种群的表型分化程度、变异模式及地理变异规律,以山西 19 个种群为研究对象,采用巢式方差分析、相关分析、聚类分析等方法从形态学角度对五角枫种群的叶片、果实、种子等 23 个表型性状进行了系统分析。结果表明:(1)五角枫 23 个表型性状中除果柄长(FSL)、着生痕(BTM)、种子长/宽(SLW)以外,其余 20 个表型性状在种群间和种群内均存在显著和极显著差异。(2)19 个种群的平均变异系数为 18.07。叶片、果实、种子的平均表型变异系数依次为:果实 19.78% > 叶片 18.77% > 种子 10.25%。(3)五角枫种群间表型分化系数( $V_{ST}$ )均值为 48.82%,种群内变异(51.18%)与种群间变异(48.82%)基本相当。叶片、果实、种子表型分化系数的平均值为:叶片 58.08% > 果实 41.24% > 种子 25.87%。(4)五角枫叶片、果实和种子的信息多样性指数( $H$ )为:叶片 6.1079 > 果实 5.9118 > 种子 5.2855;多样性指数平均值( $D$ )分别为:果实 0.9967 > 叶片 0.9961 > 种子 0.9948。(5)主成分分析结果显示:五角枫种群表型多样性基本来源为:叶片贡献率 > 果实贡献率 > 种子贡献率。(6)五角枫表型变异呈现出以经度和纬度变异并存的趋势,少数表型性状与经度和纬度呈现显著或极显著相关。(7)利用欧氏距离对五角枫种群进行 UPGMA 聚类分析,将五角枫 19 个种群划分为两大类群。五角枫种群具有较高的表型多样性,种群间和种群内均存在丰富的表型变异,与其遗传特点和分布生境等密切相关,研究结果为今后五角枫种质资源的保护和利用奠定了基础。

**关键词:**五角枫; 种群; 表型性状; 表型分化

## Phenotypic Diversity of *Acer mono* Maxim Population

ZHANG Cuiqin, JI Zhifeng, LIN Lili, ZHAO Ruihua, WANG Yiling\*

College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China

**Abstract:** Based on field investigations and analysis of the distributions of *Acer mono* Maxim, 19 populations were sampled to provide insights into the variation trends, distribution patterns, mechanisms, and adaption of 23 phenotypic traits by variance analysis, relevance analysis, and the UPGMA cluster analysis. The results showed the following: (1) there were significant differences between 20 phenotypic traits among and within populations except for FSL (Fruit stalk length), BTM (Bears the mark), SLW (The ratio seed length to width). (2) The average value of coefficient of variation ( $CV$ ) was 18.07, and the trend of  $CV$  was as follows: fruit (19.78%) > leaf (18.77%) > seed (10.25%). (3) The mean phenotypic differentiation coefficient  $V_{ST}$  of populations was 50.66%. The variation among populations (48.82%) was approximately equal to that within populations (51.18%). The order of  $V_{ST}$  was leaf (58.08%) > fruit (41.24%) > seed (25.87%). (4) The trend of the Shannon-Wiener index  $H$  was leaf (6.1079) > fruit (5.9118) > seed (5.2855), and that of the Simpson index  $D$  was fruit (0.9967) > leaf (0.9961) > seed (0.9948). (5) Principal component analysis (PCA) showed that the main variation sources of *A. mono* was leaf > fruit > seed. (6) The phenotypic trait variations of *A. mono* populations were affected by longitude and latitude in spatial distributions. There was significant correlation between some traits and the longitude/latitude. (7) The 19 populations of *A. mono* clustered into 2 groups according to the UPGMA cluster analysis. High phenotypic diversity occurred in the *A. mono* populations. Together these results provide a foundation for the

收稿日期: 2014-04-01; 网络出版日期: 2014-09-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylwangbj@hotmail.com

preservation and utilization of *A. mono*.

**Key Words:** *Acer mono*, population, phenotypic traits, phenotypic differentiation

五角枫(*Acer mono* Maxim),又名色木槭,隶属槭树科(Aceraceae)槭属(*Acer*),多年生落叶乔木,广泛分布于东北、华北及长江流域各省,其木材重而坚韧、强度高,木纹美观,是制作家具、室内装修的优良材料<sup>[1]</sup>;种仁富含蛋白质,可用于榨油,且油渣味甜、无怪味,是很好的饲料;种皮和果翅富含单宁,是皮革工业的重要原料;五角枫单宁具有镇静、催眠、镇痛的作用,有明显抗凝血作用,是治疗心脑血管疾病中抗脑血栓的新药;五角枫也是重要的园林绿化景观树种,对防治大气污染和保护环境有明显作用<sup>[2]</sup>。目前种群处于下降的趋势,分布也较以前零散,在《中国物种红色名录》被列为“近危种”<sup>[3]</sup>。

长期以来,国外关于五角枫的研究较少,只是对五角枫的分类和命名<sup>[4]</sup>及五角枫灌水量的不同对秋霜过后叶色的变化<sup>[5]</sup>、五角枫的移栽成活率与哪些因素有关<sup>[6]</sup>等方面进行了研究。在国内关于五角枫的研究主要集中于五角枫的叶片、果实、种子中有效成分提取和分析、生理生态、苗木繁育、嫩枝扦插生根等方面,赵宗林<sup>[7]</sup>对五角枫的生长情况进行的研究发现五角枫在向阴地方生长好于向阳地方,且在不同的生长条件下五角枫成活率显著高于核桃、侧柏、油松等植株;张军保<sup>[8]</sup>研究发现五角枫种子的休眠主要由种皮所致;沈祥侠等<sup>[9]</sup>对五角枫成活率进行研究表明五角枫种子经过水浸泡处理后能提高其在干旱地的成活率,对其后期的苗木形成也有促进作用;殷东升<sup>[10]</sup>对色木槭次生林种群结构动态分析发现,在东北地区种群目前为增长型种群。目前为止,关于五角枫的表型多样性研究却少有报道。

本文运用群体数量遗传学与生态遗传学相结合的理论和方法,试图对 19 个五角枫种群的叶片、果实、种子等形态学表型特征进行研究,旨在揭示五角枫不同种群的表型变异程度、遗传结构与地理变异的规律及五角枫种群间和种群内的表型变异水平,分析引起变异的原因及表型变异与生态因子之间的关系,以便于五角枫资源的保护及合理利用。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料采集

于 2011—2012 年在山西选取了 19 个种群(表 1),基本覆盖了五角枫在山西的分布,每个采集样地作为一个种群处理,根据种群的大小,每个种群选取至少 20 株生长正常、无明显病虫害的成年个体植株,单株间的距离大于 50 米(为了防止母系遗传),然后在每个植株的东南西北四个方位树冠中部着生的当年生枝条上各采集 5 片完好无损的叶片和果实,用 FAA 固定带回实验室进行测量。采用全球卫星定位系统(Global Positioning System GPS)观测每个种群的经纬度,用罗盘仪测定坡度(表 1)。

### 1.2 表型性状测量及方法

根据 Vikram<sup>[11]</sup>的方法,测量叶片、果实、种子的各项指标。包括叶片长(Laminae length, LML)、叶片宽(Laminae width, LW)、叶柄长(Leafstalk length, LSL)、叶柄宽(Leafstalk width, LSW)、叶柄基部宽(Laminae foot width, LFW)、叶尖长(leaf apex length, LAL)、叶尖宽(leaf apex width, LAW)、叶脉角(Angle of the nervation,  $\alpha$ )、左侧角(Angle on the left,  $\beta$ )、叶片基部角(Angle of leaf blade base,  $\gamma$ )、叶尖至左侧最宽处长(Length of the wide between the tip and the left,  $L_L$ )、叶尖至左侧最宽处高(height of the wide between the tip and the left,  $L_H$ )、叶面积(Laminae area, LA);翅果长(Key fruit length, KFL)、翅果宽(Key fruit width, KFW)、翅果柄长(Key fruit stalk length, KFSL)、果柄长(Fruit stalk length, FSL)、着生痕(Bears the mark, BTM)、果长(Fruit length, FL)、果宽(Fruit width, FW);种子长(Seed length, SL)、种子宽(Seed width, SW)、种子长/宽(The ratio seed length to width, SLW)。

表 1 采集种群的地理位置  
Table 1 Location of the natural populations in Shanxi

| 种群<br>Population | 采集地<br>Location | 个体数<br>Individual number | 海拔<br>Altitude/m | 经度<br>Latitude | 纬度<br>Longitude | 坡度<br>Slope/(°) |
|------------------|-----------------|--------------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| XTS              | 兴唐寺             | 20                       | 1400—2200        | 111°51′        | 36°25′          | 25              |
| QLY              | 七里峪             | 35                       | 1400—1800        | 111°59′        | 36°37′          | 20              |
| SGS              | 石膏山             | 30                       | 1400—1600        | 110°30′        | 36°15′          | 25              |
| LKS              | 灵空山             | 25                       | 1350—1550        | 112°04′        | 36°31′          | 20              |
| CZWH             | 长治卫华            | 25                       | 1600—1800        | 112°07′        | 36°42′          | 5               |
| JMLC             | 介庙林场            | 28                       | 1450—1600        | 111°55′        | 36°48′          | 5               |
| CYG              | 朝阳沟             | 20                       | 1550—1800        | 111°13′        | 36°33′          | 10              |
| HHG              | 黑虎沟             | 35                       | 1600—1800        | 111°12′        | 36°36′          | 15              |
| RC               | 芮城              | 30                       | 1300—1600        | 111°32′        | 34°47′          | 10              |
| QS               | 沁水              | 30                       | 1550—1850        | 111°36′        | 36°16′          | 20              |
| SWP              | 舜王坪             | 25                       | 1800—2000        | 111°56′        | 35°21′          | 25              |
| LSHG             | 历山混沟            | 25                       | 1000—1300        | 111°52′        | 35°21′          | 20              |
| DHLC             | 大河林场            | 25                       | 1600—1800        | 111°56′        | 35°28′          | 10              |
| CCLC             | 陈村林场            | 20                       | 1100—1500        | 111°28′        | 36°15′          | 15              |
| YQS              | 云丘山             | 30                       | 1300—1600        | 111°05′        | 35°45′          | 15              |
| MS               | 蒙山              | 30                       | 1400—1600        | 112°28′        | 37°45′          | 20              |
| XZS              | 系舟山             | 30                       | 1350—1600        | 112°39′        | 38°03′          | 10              |
| YSW              | 榆树湾             | 25                       | 1300—1800        | 113°34′        | 38°41′          | 18              |
| JGK              | 金岗库             | 30                       | 1400—1800        | 113°30′        | 39°01′          | 17              |

注:种群名为采集地的拼音首字母

1.3 统计分析方法

应用 SPSS17.0 软件对各五角枫各表型性状值进行计算其平均值、标准差、表型分化系数、表型变异系数及对五角枫各表型性状进行主成分分析并与采集样地的地理信息进行相关性分析,利用 BIO-Dap 软件对五角枫各种群的 Simpson 多样性指数  $D=1-\sum P_i^2$  和 Shannon-Wiener 信息多样性指数  $H=-\sum P_i \ln P_i$  进行计算,其中  $P_i$  为某性状第  $i$  个代码值出现的概率;利用 NTSYS-pc2.11 软件采用非加权配对算数平均法(UPGMA)对五角枫种群进行聚类分析<sup>[12]</sup>。

2 结果与分析

2.1 各表型性状在种群间和种群内的差异

19 个种群五角枫叶片、果实、种子 23 个表型性状在种群间和种群内两个层次上的变异均方以及 F 值见表 2。从表中可以看出,经过 F 值检验,五角枫性状除 FSL、BTM、SLW 以外,其他 20 个表型性状在种群间和种群内均存在显著和极显著差异,表明五角枫性状在种群间、种群内稳定性较差,均存在着广泛的变异。

2.2 山西五角枫种群的表型变异特征

变异系数 CV 的大小可反映表型性状的离散程度,变异系数越大,性状的离散程度就越大。五角枫种群的表型性状变异系数见表 3。从表中看出,五角枫 23 个表型性状的变异系数范围在 8.49—32.90 之间,平均变异系数为 18.07;同一表型性状在不同种群中变异系数差别很大,如:叶尖长(LAL)在沁水(QS)(28.12)最大,在黑虎沟(HHG)(6.86)变异最小;五角枫同一种群中的不同性状变异系数也有很大差别,如:大河林场(DHLC)的翅果数量(KFN)变异系数(50.7)最大,着生痕(BTM)变异系数(5.82)最小,说明不同生态因子对同一性状的影响或不同性状对同一生态因子的反应不同。

表 2 五角枫种群间及种群内的表型性状方差分析

Table 2 Variance analysis of phenotypic traits among/within populations of *Acer mono Maxim*

| 性状<br>Traits   | 平均方差 Mean square         |                           |                    | F 值 F value              |                           |
|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|
|                | 种群间<br>Among populations | 种群内<br>Within populations | 机误<br>Random error | 种群间<br>Among populations | 种群内<br>Within populations |
| LML            | 3400.9590                | 118.8130                  | 0.3617             | 63.79 **                 | 28.63 **                  |
| LW             | 6263.7630                | 240.8140                  | 0.7099             | 88.43 **                 | 26.01 **                  |
| LSL            | 4423.5360                | 460.5370                  | 0.4405             | 8.90 **                  | 9.61 **                   |
| LSW            | 1.2710                   | 0.0320                    | 0.0001             | 57.30 **                 | 39.77 **                  |
| LFW            | 10.9690                  | 0.2540                    | 0.0014             | 231.81 **                | 43.25 **                  |
| LAL            | 0.4570                   | 0.0560                    | 0.0304             | 5.11 **                  | 4.94 **                   |
| LAW            | 0.0570                   | 0.0340                    | 0.8814             | 4.60 **                  | 3.37 **                   |
| $\alpha$       | 156.6120                 | 19.0950                   | 0.0002             | 7.79 **                  | 8.20 **                   |
| $\beta$        | 5406.6020                | 224.3360                  | 0.0001             | 73.80 **                 | 29.22 **                  |
| $\gamma$       | 8003.1700                | 558.2000                  | 0.0001             | 20.93 **                 | 4.04 **                   |
| L <sub>L</sub> | 20.7190                  | 13.3310                   | 0.0001             | 13.83 **                 | 4.36 **                   |
| L <sub>H</sub> | 7.2490                   | 1.9950                    | 0.0001             | 12.11 **                 | 11.27 **                  |
| LA             | 679.0000                 | 57.0000                   | 0.0314             | 9.59 **                  | 4.44 *                    |
| KFL            | 168.0000                 | 84.0000                   | 0.0168             | 16.28 **                 | 8.15 **                   |
| KFW            | 28.5000                  | 5.1000                    | 0.0029             | 23.13 **                 | 4.04 *                    |
| KFSL           | 150.3500                 | 74.3900                   | 0.0041             | 28.25 **                 | 2.02 *                    |
| FSL            | 59.3700                  | 19.7300                   | 0.005              | 0.35                     | 0.18                      |
| BTM            | 2.5300                   | 0.4500                    | 0.0003             | 0.23                     | 0.12                      |
| FL             | 13.9100                  | 0.1120                    | 0.0001             | 11.05 **                 | 3.10 *                    |
| FW             | 5.8900                   | 1.6900                    | 0.0006             | 8.90 **                  | 2.56 *                    |
| SL             | 4.4500                   | 4.7000                    | 0.0001             | 14.71 **                 | 13.91 **                  |
| SW             | 3.3600                   | 3.5000                    | 0.0001             | 15.19 **                 | 19.38 **                  |
| SLW            | 0.0300                   | 0.0200                    | 0.0002             | 0.09                     | 0.01                      |

\* 表示在 0.05 水平上差异达到显著性; \*\* 表示在 0.01 差异达到显著性

LML: 叶片长 (Laminae length)、LW: 叶片宽 (Laminae width)、LSL: 叶柄长 (Leafstalk length)、LSW: 叶柄宽 (Leafstalk width)、LFW: 叶柄基部宽 (Laminae foot width)、LAL: 叶尖长 (leaf apex length)、LAW: 叶尖宽 (leaf apex width)、 $\alpha$ : 叶脉角 (Angle of the nervation)、 $\beta$ : 左侧角 (Angle on the left)、 $\gamma$ : 叶片基部角 (Angle of leaf blade base)、LL: 叶尖至左侧最宽处长 (Length of the wide between the tip and the left)、LH: 叶尖至左侧最宽处高 (height of the wide between the tip and the left)、LA: 叶面积 (Laminae area)、KFL: 翅果长 (Key fruit length)、KFW: 翅果宽 (Key fruit width)、KFSL: 翅果柄长 (Key fruit stalk length)、FSL: 果柄长 (Fruit stalk length)、BTM: 着生痕 (Bears the mark)、FL: 果长 (Fruit length)、FW: 果宽 (Fruit width)、SL: 种子长 (Seed length)、SW: 种子宽 (Seed width)、SLW: 种子长/宽 (The ratio seed length to width)

变异系数的结果还间接反映五角枫种群的多样性丰富程度, 平均变异系数大说明种群变异幅度较大, 丰富性较高。从表 3 可以看出五角枫种群内平均表型变异系数由大到小依次为: LKS (25.93) > QS (25.05) > JMLC (24.24) > SGS (23.64) > CCLC (23.24) > RC (22.97) > CZWH (22.68) > YQS (22.60) > DHLC (22.00) > LSHG (21.97) > SWP (21.81) > HHG (21.05) > MS (21.10) > XZS (19.73) > YSW (18.94) > QLY (18.72) > JGK (18.59) > XTS (17.08) > CYG (17.90), 即位于山西省最西部和最北部的种群变异较小, 在中南部的则相对较大。

此外, 从五角枫叶片、果实、种子性状来看, 果实性状的平均变异系数值 (19.78) > 叶片性状的平均变异系数值 (18.77) > 种子性状的平均变异系数值 (10.25), 这表明在五角枫各性状的变异中, 种子是最稳定的, 果实、叶片的变异较大。

### 2.3 山西五角枫种群间的表型分化

为进一步确定 23 个表型性状的变异来源, 采用巢式方差分析将五角枫表型性状的变异分为种群间的变异、种群内的变异、机误三部分, 每一部分的方差分量百分比都能够反映五角枫的变异来源。从表 4 看出: 五角枫 23 个表型性状在种群间平均分差分量百分比为 34.86, 在种群内的分差分量百分比为 39.23, 说明五角枫

表 3 五角枫 19 个种群各表型性状的变异系数  
Table 3 Coefficients of variation of phenotypic traits of 19 populations in *Acer mono Maxim*

| 性状 Traits      | 种群 Population |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | XTS           | QLY   | SGS   | LKS   | CZWH  | JMLC  | CYG   | HHG   | RC    | QS    | SWP   | LSHG  | DHLC  | CCLC  | YQS   | MS    | XZS   | YSW   | JGK   | M     |
| LML            | 15.71         | 14.06 | 18.46 | 17.66 | 16.77 | 19.82 | 13.07 | 14.04 | 12.87 | 17.2  | 15.81 | 11.16 | 17.67 | 13.94 | 13.35 | 20.43 | 18.67 | 12.45 | 16.29 | 15.76 |
| LW             | 12.47         | 15.6  | 17.8  | 18.31 | 16.72 | 19.85 | 13.85 | 17.73 | 19.11 | 15.97 | 14.59 | 13.4  | 15.63 | 15.09 | 15.23 | 17.31 | 14.06 | 13.78 | 14.85 | 15.86 |
| LSL            | 27.59         | 32.57 | 35.72 | 39.57 | 34.29 | 34.91 | 29.39 | 32.63 | 40.29 | 38.47 | 34.52 | 30.93 | 36.14 | 33.63 | 28.94 | 23.09 | 21.36 | 35.2  | 35.82 | 32.90 |
| LSW            | 24.82         | 16.15 | 19.27 | 20.71 | 25.93 | 19.97 | 42.29 | 20.53 | 17.38 | 18.92 | 15.18 | 19.51 | 17.76 | 17.09 | 26.91 | 14.53 | 24.15 | 13.05 | 16.2  | 20.54 |
| LFW            | 21.1          | 22.23 | 23.27 | 25.17 | 19.86 | 28.85 | 21.78 | 23.47 | 18.22 | 20.98 | 24.87 | 19.72 | 25.06 | 21.46 | 26.01 | 12.84 | 12.19 | 18.15 | 19.36 | 21.29 |
| LAL            | 9.32          | 22.14 | 13.57 | 9.32  | 8.81  | 8.3   | 24.3  | 6.86  | 24.3  | 28.12 | 11.32 | 11.32 | 19.29 | 16.86 | 16.11 | 17.5  | 8.38  | 12.45 | 13.85 | 14.85 |
| LAW            | 23.7          | 44.98 | 24.98 | 23.7  | 13.98 | 12.45 | 19.44 | 19.92 | 29.44 | 22.97 | 25    | 25    | 18.11 | 19.92 | 19.92 | 23.96 | 20.53 | 19.92 | 20.15 | 22.53 |
| α              | 7.83          | 4.79  | 5.7   | 7.83  | 14.37 | 4.9   | 6.82  | 8.25  | 12.82 | 12.56 | 9.17  | 9.17  | 9.73  | 8.25  | 9.27  | 7.75  | 11.18 | 6.22  | 4.79  | 8.49  |
| β              | 8.19          | 16.96 | 16.69 | 10.89 | 9.2   | 17.96 | 18.24 | 7.43  | 15.85 | 11.38 | 13.15 | 12.02 | 15.09 | 17.1  | 10.14 | 20.56 | 13.43 | 7.46  | 16.55 | 13.59 |
| γ              | 12.88         | 17.57 | 27.81 | 15.08 | 10.49 | 11.97 | 14.22 | 11.05 | 29.93 | 18.16 | 13.46 | 20.69 | 18.12 | 11.84 | 12.15 | 15.18 | 25.07 | 20.32 | 10.37 | 16.65 |
| L <sub>L</sub> | 13.78         | 12.95 | 18.2  | 13.18 | 16.45 | 15.9  | 10.92 | 13.02 | 20.87 | 21.09 | 10.12 | 13.89 | 18.07 | 15.47 | 17.95 | 17.03 | 23.31 | 10.73 | 14.17 | 15.64 |
| L <sub>H</sub> | 12.67         | 25.23 | 18.02 | 16.91 | 25.09 | 25.03 | 20.66 | 18.15 | 20.12 | 19.44 | 16.17 | 27.4  | 37.11 | 17.92 | 22.62 | 18.01 | 20.28 | 19.8  | 25.02 | 21.35 |
| LA             | 20.5          | 27.92 | 24.43 | 26.46 | 30.2  | 35.71 | 14.46 | 10.51 | 23.45 | 24.43 | 26.57 | 29.62 | 31.14 | 28.49 | 19.41 | 28.49 | 21.35 | 18.26 | 26.7  | 24.64 |
| KFL            | 17.93         | 20.36 | 18.55 | 15.75 | 11.61 | 20.08 | 11.8  | 11.33 | 12.57 | 11.74 | 14.54 | 11.53 | 7.06  | 18.02 | 15    | 18.39 | 9.89  | 21.8  | 13.21 | 14.80 |
| KFW            | 20.19         | 14.66 | 15.09 | 19.05 | 17.13 | 23.11 | 16.7  | 12.67 | 20.91 | 18.74 | 16.86 | 15.46 | 8.51  | 16.18 | 14.15 | 21.65 | 15.13 | 26.79 | 13.66 | 17.19 |
| KFSL           | 33.49         | 25.86 | 29.33 | 36.62 | 41.27 | 30.73 | 31.31 | 38.7  | 31.79 | 23.99 | 38.84 | 35.24 | 35.91 | 45.75 | 41.54 | 32.78 | 37.83 | 31.65 | 11.74 | 33.39 |
| FSL            | 43.48         | 42.66 | 39.56 | 39.46 | 35.81 | 34.88 | 41.17 | 15.21 | 48.42 | 24.97 | 27.46 | 33.22 | 20.79 | 47.7  | 56.75 | 24.42 | 30.14 | 40.5  | 14.07 | 34.77 |
| BTM            | 21.39         | 13.99 | 17.64 | 8.91  | 12.78 | 15.53 | 11    | 12.76 | 18.11 | 9.94  | 8.16  | 7.18  | 5.82  | 22.3  | 18.12 | 21.1  | 8.78  | 9.86  | 9.89  | 13.33 |
| FL             | 19.2          | 13.09 | 15.72 | 6.57  | 10.52 | 19.57 | 9.87  | 7.35  | 18.39 | 8.04  | 10.98 | 12.99 | 16.07 | 15.41 | 8.84  | 15.97 | 5.6   | 12.06 | 20.47 | 12.98 |
| FW             | 17.21         | 18.92 | 16.86 | 5.94  | 11.72 | 18.53 | 12.85 | 5.2   | 7.75  | 16.3  | 8.88  | 9.68  | 7.32  | 11.28 | 13.14 | 18.97 | 7.22  | 11.01 | 9.56  | 12.02 |
| SL             | 19.2          | 13.09 | 15.72 | 6.57  | 10.52 | 19.57 | 9.87  | 7.35  | 18.39 | 8.76  | 6.1   | 11.71 | 13.44 | 6.26  | 8.48  | 8.06  | 5.6   | 10.82 | 7.88  | 10.92 |
| SW             | 17.21         | 18.92 | 16.86 | 5.94  | 11.72 | 18.53 | 12.85 | 5.2   | 7.75  | 8.2   | 9.8   | 9.29  | 13.66 | 8.34  | 10.1  | 7.83  | 7.22  | 11.44 | 6.18  | 10.90 |
| SLW            | 3.35          | 6.06  | 7.16  | 18.42 | 9.89  | 3.86  | 8.89  | 7.8   | 17.5  | 7.38  | 10.99 | 10.11 | 10.45 | 12    | 5.73  | 8.79  | 6.48  | 6.9   | 8.25  | 8.95  |
| M              | 17.08         | 18.72 | 23.64 | 25.93 | 22.68 | 24.24 | 17.9  | 21.05 | 22.97 | 25.05 | 21.81 | 21.97 | 22.00 | 23.24 | 22.60 | 20.10 | 19.73 | 18.94 | 18.59 | 18.07 |

在种群间的分化程度和种群内的分化程度大致相当。

五角枫不同表型性状分化程度相差很大,其表型分化系数  $V_{ST}$  变异幅度为 13.38%—83.78%,在 23 个表型性状中,叶片、果实、种子表型分化系数的平均值为叶片 (55.08%)>果实 (41.24%)>种子 (25.87%),即营养器官的变异程度大于生殖器官的变异程度。

#### 2.4 山西五角枫种群的表型多样性指数

对五角枫种群及表型性状进行了多样性指数比较(表 5),23 个表型性状的 Shannon-Wiener 信息多样性指数  $H$  变化范围为 4.47227—7.02417, Simpson 多样性指数  $D$  变化范围为 0.98761—0.9991,叶片、果实和种子的信息多样性指数、多样性指数平均值分别为叶片 ( $H$ :6.1079)>果实 ( $H$ :5.9118)>种子 ( $H$ :5.2855);果实 ( $D$ :0.9967)>叶片 ( $D$ :0.9961)>种子 ( $D$ :0.9948),表明叶片与果实种子相比遗传多样性较高,性状间分布较均匀。五角枫 19 个种群的平均多样性指数  $H$ 、 $D$  分别为 2.6780、0.9034,说明种群间存在较高的多样性,其中七里峪 (QLY) 的信息多样性指数和多样性指数最高,榆树湾 (YSW) 最小;Shannon-Wiener 信息多样性指数 ( $H$ ) 从高到低依次为:QLY>CZWH>HHG>RC>SGS>CYG>LSHG>DHLC>XTS>SWP>CCLC>YQS>JMLC>LKS>XZS>JGK>QS>MS>YSW;多样性指数 ( $D$ ) 变化趋势为:QLY>XZS>CZWH>RC>YQS>SGS>CYG>CCLC>DHLC>LKS>XTS>SWP>LSHG>JMLC>QS>MS>HHG>JGK>YSW,说明山西省的南部的五角枫变异相对丰富,多样性较高,这与变异系数所得结果一致。

表 4 五角枫表型性状方差分量及种群间表型分化系数

Table 4 Variance portions and differentiation coefficients of phenotypic traits among/within populations in *Acer mono* Maxim

| 性状<br>Traits | 方差分量<br>component of variance |                              |                    | 方差分量百分比<br>The Percentage of difference component |                              |                    | 表型分化系数<br>Phenotypic<br>differentiation<br>coefficient $V_{ST}$ |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|
|              | 种群间<br>Among<br>populations   | 种群内<br>Within<br>populations | 机误<br>Random error | 种群间<br>Among<br>populations                       | 种群内<br>Within<br>populations | 机误<br>Random error |                                                                 |
| LML          | 0.6511                        | 0.5782                       | 0.3617             | 40.92                                             | 36.34                        | 22.73              | 52.97                                                           |
| LW           | 0.2778                        | 0.0648                       | 0.7099             | 26.39                                             | 6.16                         | 67.45              | 81.09                                                           |
| LSL          | 0.793                         | 0.752                        | 0.4405             | 39.94                                             | 37.87                        | 22.19              | 51.33                                                           |
| LSW          | 0.2278                        | 0.2161                       | 0.0001             | 51.31                                             | 48.67                        | 0.02               | 51.32                                                           |
| LFW          | 0.0025                        | 0.0019                       | 0.0014             | 43.10                                             | 32.76                        | 24.14              | 56.82                                                           |
| LAL          | 0.0089                        | 0.0166                       | 0.0304             | 15.92                                             | 29.70                        | 54.38              | 34.90                                                           |
| LAW          | 0.268                         | 0.2797                       | 0.8814             | 18.75                                             | 19.57                        | 61.68              | 48.93                                                           |
| $\alpha$     | 0.0012                        | 0.0009                       | 0.0002             | 52.17                                             | 39.13                        | 8.70               | 57.14                                                           |
| $\beta$      | 0.0008                        | 0.0006                       | 0.0001             | 53.33                                             | 40.00                        | 6.67               | 57.14                                                           |
| $\gamma$     | 0.0006                        | 0.0004                       | 0.0001             | 54.55                                             | 36.36                        | 9.09               | 60.00                                                           |
| $L_L$        | 0.0005                        | 0.0003                       | 0.0001             | 55.56                                             | 33.33                        | 11.11              | 62.50                                                           |
| $L_H$        | 0.0004                        | 0.0003                       | 0.0001             | 50.00                                             | 37.50                        | 12.50              | 57.14                                                           |
| LA           | 0.0031                        | 0.0006                       | 0.0314             | 8.83                                              | 1.71                         | 89.46              | 83.78                                                           |
| KFL          | 0.0008                        | 0.0017                       | 0.0168             | 4.15                                              | 8.81                         | 87.05              | 32.00                                                           |
| KFW          | 0.0052                        | 0.0051                       | 0.0029             | 39.39                                             | 38.64                        | 21.97              | 50.49                                                           |
| KFSL         | 0.0106                        | 0.0686                       | 0.0041             | 12.73                                             | 82.35                        | 4.92               | 13.38                                                           |
| FSL          | 0.0271                        | 0.014                        | 0.005              | 58.79                                             | 30.37                        | 10.85              | 65.94                                                           |
| BTM          | 0.0005                        | 0.0005                       | 0.0003             | 38.46                                             | 38.46                        | 23.08              | 50.00                                                           |
| FL           | 0.0025                        | 0.0068                       | 0.0001             | 26.60                                             | 72.34                        | 1.06               | 26.88                                                           |
| FW           | 0.001                         | 0.001                        | 0.0006             | 38.46                                             | 38.46                        | 23.08              | 50.00                                                           |
| SL           | 0.0008                        | 0.0016                       | 0.0001             | 32.00                                             | 64.00                        | 4.00               | 33.33                                                           |
| SW           | 0.0006                        | 0.0014                       | 0.0001             | 28.57                                             | 66.67                        | 4.76               | 30.00                                                           |
| SLW          | 0.0001                        | 0.0006                       | 0.0002             | 11.11                                             | 66.67                        | 22.22              | 14.29                                                           |
| M            |                               |                              |                    | 34.86                                             | 39.23                        | 25.90              | 48.82                                                           |

表 5 五角枫 19 个种群表型多样性指数

Table 5 Shannon-Wiener and Simpson genetic diversity index based on phenotypic traits of 19 populations in *Acer mono Maxim*

| 性状<br>Traits | Shannon-Wiener<br>信息多样性指数<br>Shannon-Wiener<br>diversity index <i>H</i> | Simpson<br>多样性指数<br>Simpson diversity<br>index <i>D</i> | 种群<br>population | Shannon-Wiener<br>信息多样性指数<br>Shannon-Wiener<br>diversity index <i>H</i> | Simpson<br>多样性指数<br>Simpson diversity<br>index <i>D</i> |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| LML          | 7.02417                                                                 | 0.9991                                                  | XTS              | 2.67935                                                                 | 0.90309                                                 |
| LW           | 7.02241                                                                 | 0.99909                                                 | QLY              | 2.7373                                                                  | 0.91119                                                 |
| LSL          | 6.982                                                                   | 0.99902                                                 | SGS              | 2.69666                                                                 | 0.90689                                                 |
| LSW          | 7.00505                                                                 | 0.99906                                                 | LKS              | 2.66403                                                                 | 0.90363                                                 |
| LFW          | 7.00076                                                                 | 0.99905                                                 | CZWH             | 2.73425                                                                 | 0.90814                                                 |
| LAL          | 5.28483                                                                 | 0.99489                                                 | JMLC             | 2.66801                                                                 | 0.90134                                                 |
| LAW          | 5.28265                                                                 | 0.98761                                                 | CYG              | 2.69606                                                                 | 0.90668                                                 |
| $\alpha$     | 5.2624                                                                  | 0.98918                                                 | HHG              | 2.70993                                                                 | 0.89667                                                 |
| $\beta$      | 6.07603                                                                 | 0.99765                                                 | RC               | 2.69753                                                                 | 0.90768                                                 |
| $\gamma$     | 6.07025                                                                 | 0.99763                                                 | QS               | 2.64851                                                                 | 0.90129                                                 |
| $L_L$        | 6.09676                                                                 | 0.99772                                                 | SWP              | 2.6764                                                                  | 0.90267                                                 |
| $L_H$        | 6.08196                                                                 | 0.99765                                                 | LSHG             | 2.68221                                                                 | 0.90183                                                 |
| LA           | 6.51629                                                                 | 0.99844                                                 | DHLC             | 2.68204                                                                 | 0.90448                                                 |
| KFL          | 6.3123                                                                  | 0.99816                                                 | CCLC             | 2.67045                                                                 | 0.90603                                                 |
| KFW          | 6.30379                                                                 | 0.99812                                                 | YQS              | 2.66935                                                                 | 0.90726                                                 |
| KFSL         | 5.61987                                                                 | 0.99619                                                 | MS               | 2.63757                                                                 | 0.89733                                                 |
| FSL          | 4.84706                                                                 | 0.9914                                                  | XZS              | 2.65808                                                                 | 0.91035                                                 |
| BTM          | 5.66481                                                                 | 0.99649                                                 | YSW              | 2.62575                                                                 | 0.89339                                                 |
| FL           | 6.31679                                                                 | 0.99817                                                 | JGK              | 2.64912                                                                 | 0.89478                                                 |
| FW           | 6.3183                                                                  | 0.99818                                                 |                  |                                                                         |                                                         |
| SL           | 4.52005                                                                 | 0.98884                                                 |                  |                                                                         |                                                         |
| SW           | 4.47227                                                                 | 0.99487                                                 |                  |                                                                         |                                                         |
| SLW          | 4.49803                                                                 | 0.99493                                                 |                  |                                                                         |                                                         |
| M            | 5.94648                                                                 | 0.99617                                                 | M                | 2.6780                                                                  | 0.9034                                                  |

2.5 山西五角枫表型性状间的主成分分析

在变异系数、多样性指数、方差分析的基础上进一步对五角枫叶片、果实、种子的 23 个指标进行主成分分析,找出尽可能少的变量来反映五角枫的变异。五角枫前 7 个主成份累积率达到 83.947%,这 7 个主成份中的表型性状基本可以代表原始变量所包含的所有信息。五角枫种群表型多样性基本来源为叶片贡献率 >果实贡献率 > 种子贡献率,与上面的变异系数、方差分析、多样性指数所得结果基本吻合。

2.6 山西五角枫表型性状与地理因子之间的相关性分析

将五角枫的叶片、果实、种子 23 个表型性状与采集样地的经纬度、海拔和坡度进行相关性分析与检验(表 6),其中  $L_L$ 、 $L_H$ 、FSL 与经度呈显著或极显著负相关, $\alpha$ 、 $L_H$ 、FSL 与纬度呈极显著负相关, $\gamma$  与纬度呈显著正相关,SLW 与坡度呈显著正相关,说明虽然 SL、SW 均与坡度呈正相但 SL 的增加速度大于 SW 的增加速度。而五角枫的表型性状与海拔没有明显的相关性。表明不同环境因子对同一表型性状的影响或不同性状对同一环境因子的响应不同,各个环境因子综合影响五角枫的各个性状。

2.7 山西五角枫种群表型性状的聚类分析

利用欧式距离,采用 NTSYS-pc2.11 软件,运用非加权配对算数平均法(UPGMA)对山西五角枫 19 个种群的叶片、果实、种子的 23 个表型性状数据进行聚类分析(图 1),以遗传距离 1.20 为分界线 19 个五角枫种群分为两支,第一支包含 LKS、SGS、CZWH、XTS、QLY、JMLC、DHLC、LSHG、QS、CYG、HHG 种群,其余种群聚为第二支。在第一支中,LKS、SGS、CZWH、XTS、QLY、JMLC、DHLC、LSHG、QS 又聚为一亚支,其中 LKS、SGS、CZWH、

XTS、QLY 几个种群地理位置都位于太岳山上,由于其地理环境和空间距离相近而聚为一个小亚支,JMLC、DHLC、LSHG、QS 中除 JMLC 外其他三个种群位于中条山上,其地理位置上位于晋城、临汾、运城的边界上且环境相似性较高而聚为一个小亚支;CYG、HHG 位于五鹿山上其地理位置和环境较为相似而聚为一个亚支;第二支中,YQS、SWP、CCLC、RC、MS 聚为一亚支,XZS、JGK、YSW 聚为一亚支。五角枫性状的表型特征没有依地理距离而聚类,说明五角枫种群间表型性状的不连续性。

表 6 五角枫表型性状与地理因子间的相关分析

| Table 6 Correlation coefficient between phenotypic characters and environmental factors |                |                 |                |             |              |                |                 |                |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|
| 性状<br>Traits                                                                            | 经度<br>Latitude | 纬度<br>Longitude | 海拔<br>Altitude | 坡度<br>Slope | 性状<br>Traits | 经度<br>Latitude | 纬度<br>Longitude | 海拔<br>Altitude | 坡度<br>Slope |
| LML                                                                                     | -0.309         | -0.401          | -0.090         | 0.159       | LW           | -0.335         | -0.362          | 0.007          | 0.332       |
| LSL                                                                                     | -0.283         | -0.344          | -0.304         | 0.135       | LSW          | -0.102         | -0.230          | 0.019          | 0.126       |
| LFW                                                                                     | -1.185         | -0.278          | 0.066          | 0.236       | LAL          | 0.008          | 0.018           | -0.139         | 0.249       |
| LAW                                                                                     | 0.005          | 0.151           | -0.224         | 0.425       | $\alpha$     | -0.376         | -0.597 **       | -0.164         | -0.117      |
| $\beta$                                                                                 | -0.150         | -0.365          | -0.372         | -0.309      | $\gamma$     | 0.256          | 0.510 *         | -0.186         | -0.053      |
| $L_L$                                                                                   | -0.469 *       | -0.423          | -0.091         | -0.074      | $L_H$        | -0.591 **      | -0.597 **       | -0.046         | 0.216       |
| LA                                                                                      | -0.144         | 0.099           | -0.180         | 0.193       | KFL          | 0.172          | 0.226           | -0.028         | -0.140      |
| KFW                                                                                     | 0.030          | -0.043          | -0.100         | -0.210      | KFSL         | 0.270          | 0.157           | 0.265          | 0.207       |
| FSL                                                                                     | -0.532 *       | -0.591 **       | -0.096         | -0.273      | BTM          | 0.328          | 0.309           | 0.228          | 0.120       |
| FL                                                                                      | -0.006         | 0.277           | 0.189          | 0.314       | FW           | 0.145          | 0.340           | 0.119          | 0.243       |
| SL                                                                                      | 0.187          | 0.236           | 0.022          | 0.246       | SW           | 0.227          | 0.261           | -0.145         | 0.307       |
| SLW                                                                                     | -0.197         | -0.196          | 0.416          | 0.456 *     |              |                |                 |                |             |

3 结论与讨论

五角枫 19 个种群 23 个表型性状在种群内和种群间均存在较大变异,且在种群内和种群间分布不均匀。而表型性状变异是《中国植物志》等各类植物志对物种定义的根据,本文以种群为单位,对分布于山西的 19 个五角枫种群调查时发现:有的地区的五角枫叶片不仅有五裂也有七裂,刘秀梅<sup>[13]</sup>也报道了五角枫的一新变种为七裂,说明同一种群内的表型变异已超出了传统意义上对物种的定义。肖海峻等<sup>[14]</sup>曾对我国的 40 个鹅观草种群的表型性状研究发现同样的现象,兰保祥<sup>[15]</sup>对蒙古冰草种群的研究也说明同样的道理,因此,研究物种的表型多样性不仅为品种命名提供重要依据,而且对于种质资源的保护也意义重大。

植物种群形态不仅受大环境地理气候的影响,也受小生境条件及个体发育差异(母系遗传效应、营养条件不一或发育阶段、年龄不同)的影响<sup>[16]</sup>。五角枫 23 个表型性状中的变异幅度为 8.49—32.90,果实变异系数(19.78)>叶片变异系数(18.77)>种子变异系数(10.25),营养性状的变异水平大于繁殖性状的变异水平。一般而言,环境变化容易引起植株的高矮、叶片的长短等营养性状的变化,而繁殖器官的变异则经历了较为复杂的发育分化后改变较少,环境的不同是导致营养器官变异的主要原因<sup>[17]</sup>。五角枫种子是传递遗传物质的载体,变异较小,稳定性较高,受到环境影响较小。五角枫种子的稳定性在一定程度上可以反映五角枫果实变异的程度<sup>[18]</sup>。

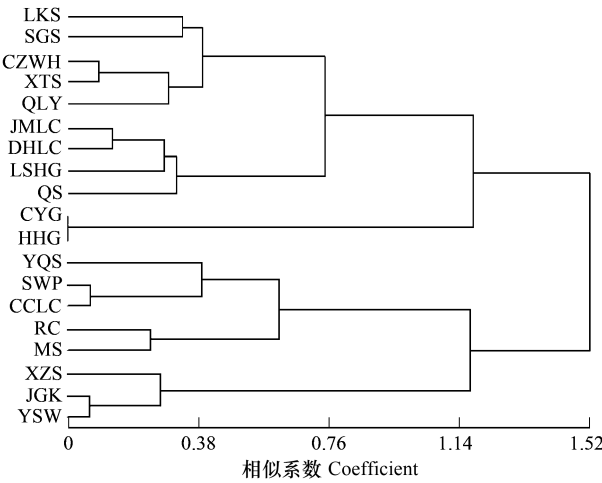


图 1 基于 23 个表型性状的五角枫种群的欧式距离 UPGMA 聚类树形图

Fig. 1 UPGMA-derived dendrogram based on Euclidean distances showing the clustering of the 23 phenotype traits of *Acer mono Maxim*

种群变异系数反映五角枫种群的多样性丰富度,19 个种群的平均变异系数为 18.07。总体规律为位于山西西部及北部的种群变异较小,中南部变异较大。笔者认为造成这种变异模式的原因有(1)不同地区的生态环境,山西地处大陆东岸中纬度内陆,西部比邻黄河流域,空气相对湿润温暖,北部受内蒙古冬季冷团袭击,较为寒冷,而中南部地区则相对适宜,野外研究发现:五角枫在北部呈块状分布,南部则多呈现片状分布,因此环境差异是造成其变异差异的主要原因之一<sup>[16]</sup>;(2)空间地理隔离,不同地区内,由于特定的地理地势,使种群在一定的地理范围内进行有限的基因流动<sup>[15]</sup>,从而使各个种群间变异显著;(3)不同发育过程,不同种群因特异的地理位置而表现出不同步的发育过程,野外调查研究发现:处于北部的金岗库和榆树湾比其他地区的五角枫的不论是长势还是结果率,都相对较差;(4)人为活动一定程度上也影响五角枫的遗传变异,从而影响其表型分化。

五角枫种群平均多样性指数  $H$  和  $D$  分别为 2.6780、0.9034,与同类槭科植物茶条槭( $H:1.9253$ ;<sup>[19]</sup>、乔木植物梅花( $H:1.5810,D:0.5390$ ;<sup>[20]</sup>、寒地梨( $H:0.7075,D:0.775$ ;<sup>[21]</sup>相比均表现出较高的多样性,这与五角枫适应广泛的生长环境有一定的关系,在野外采集标本时发现五角枫生长范围很广,干旱、湿润、山坡、山谷、林缘外等地均能很好的生长,通过多样性指数发现五角枫性状中叶片、果实的性状的多样性指数均高于种子,由此可见,不同的物种对环境的适应能力不同,而且同一物种的不同性状对同一环境因子反应不同或不同环境对同一表型性状影响不同,这是五角枫长期与环境因子和遗传因子相互磨合的结果,这与变异系数结果基本吻合。

五角枫种群的平均表型分化系数为 48.82%,说明五角枫种群表型变异在种群间的贡献率为 48.82%,在种群内的贡献率为 51.18%,种群内与种群间的变异基本相当,这就体现了群体  $G \times E$ (群体复杂度和群体复杂熵,群体复杂度代表强度性质,反映群体内个体间的差异情况;复杂熵代表复杂程度,具容量性质)的复杂性及其适应环境压的广泛程度,是不同环境选择的结果,也是种群间分化的根本原因<sup>[22]</sup>。五角枫为风媒传粉植物,果实为翅果,其花粉和果实在风力的作用下均可传播,但五角枫种子定居萌发成新个体的能力较弱、个体萌发整齐性差使种群内个体发育不一,差异显著,使得种群内存在较高变异<sup>[18]</sup>。与其他植物相比,五角枫的平均表型分化系数高于槭科的同类植物茶条槭(13.79)<sup>[19]</sup>、乔木白皮松(22.86%)<sup>[23]</sup>、川西云杉(36.53%)<sup>[24]</sup>、禾本科芒(32.05%)<sup>[25]</sup>、云南含笑(24.38%)<sup>[26]</sup>、皂荚(20.42%)<sup>[27]</sup>、濒危植物脱皮榆(28.102%)<sup>[28]</sup>、草本植物岩陀(43.23%)<sup>[29]</sup>,略低于同科植物葛萝槭(50.16%)<sup>[30]</sup>、无患子科落叶大乔木无患子(62.21%)<sup>[31]</sup>,说明五角枫对环境广泛的适应能力。

五角枫表型性状并未与所有地理因子显著相关,聚类结果也显示五角枫种群没有严格按照地理距离而聚类,表明五角枫种群表型性状变异的不连续性。依据山西的地理位置则从南到北随着纬度和经度的不断加大,五角枫叶片、果实、种子表型性状呈现逐渐变小的趋势。可能是随着温度的降低、气候条件、土壤等因素不适合五角枫的生长。这与乔木蒙古栎<sup>[32]</sup>的变异规律基本相反。可见不同的物种变异机理不同,五角枫在长期的生长和演化过程中,对不同的环境形成了不同的适应机制,从而产生了各种变异。聚类分析以遗传距离 1.20 为分界线把五角枫的 19 个种群分为两大类,山西中部的地区聚为一类,最南边和最北边聚为一类,这是五角枫在不同分布范围内,受到地理环境、气候、土壤等不同条件的影响以及环境选择压不同,通过形态、生理和生化变化协调自身的生长发育与环境之间的关系来适应多样的环境的结果,也是五角枫表型多样性丰富,抗性强的原因所在。

#### 4 结论

五角枫种群的 23 个性状在种群内和种群间均表现出显著差异;营养器官的变异水平及载荷均大于生殖器官的变异水平及载荷。叶片、种子和果实的表型性状与海拔、经度、纬度、坡度表现出不同的相关性,说明不同环境对同一性状及同一环境对不同性状影响不同。所以,建议在对五角枫进行种质资源收集和保护时以种群为单位进行研究,这可以减少五角枫因环境差异而造成在物种分类水平上的性状交叉、物种界限不清带来

的分类难题,特别是槭属植物的表型性状本来在自然环境中就难以区分,如果这样实施,将对槭属植物中核心种质基因库保存提供有利保障。

#### 参考文献(References):

- [1] 程红梅. 大蜀山五角枫林的群落结构及物种多样性. 经济林研究, 2009, 27(4): 41-45.
- [2] 李茂香. 五角枫育苗造林技术. 安徽林业, 2002, (3): 22-22.
- [3] 张宝. 槭属种质资源的收集、保存、研究及信息管理系统的创建 [D]. 泰安: 山东农业大学林学院, 2007.
- [4] Toy S J. Effect of irrigation on autumn leaf coloration in the Purpleblow maple, *Acer truncatum*. Hort-Science, 1969, 4(1): 52-53.
- [5] Pair J C. Propagation of *Acer truncatum*, a new introduction to the southern Great Plains. Combined Proceedings-International Plant Propagators' Society, 1987, 36: 403-408.
- [6] Barton A J, Walsh C S. Effect of transplanting on water relations and canopy development in *Acer*. Journal of Environmental Horticulture, 2000, 18(4): 202-206.
- [7] 赵宗林. 元宝枫旱地造林调查. 陕西林业科技, 1999, (1): 14-15.
- [8] 张军保. 色木槭种子低温层积过程中贮藏物质和内源激素变化的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [9] 沈祥侠, 江舰艇, 郭倍倍. 浸根处理对干旱地造林苗木成活率的影响. 河南林业科技, 2010, 30(4): 42-43.
- [10] 殷东生, 张凤海, 山永清, 侯培军, 丁永平, 葛文志, 沈海龙. 色木槭次生林种群结构动态分析. 林业科技, 2011, 36(6): 19-22.
- [11] Vikram E. Island Population Establishment and Genetic Structure of *Picea abies* (L.) Karst. in Northern Sweden [D]. Arbetslivsinstitutet, Ume, Sweden, 2001.
- [12] Rohlf F J. NTSYS-Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System. New York: Exeter Publications, 1998.
- [13] 刘秀梅. 元宝槭一新变种. 安徽农业大学学报, 1995, 22(2): 181-182.
- [14] 肖海峻, 徐柱, 李临杭, 马玉宝. 鹅观草表型性状变异与生境间的相关性. 中国草地学报, 2007, 29(5): 22-30.
- [15] 兰保祥, 李立会, 王辉. 蒙古冰草居群遗传多样性研究. 中国农业科学, 2005, 38(3): 468-473.
- [16] 张志红, 唐恬, 周仁超, 王玉国, 简曙光, 钟才荣, 施苏华. 异质性生境对半红树植物海漆 (*Excoecaria agallocha*) 居群遗传结构的影响. 遗传学报, 2005, 32(12): 1286-1292.
- [17] 井振华, 李皓, 邵文豪, 岳华峰, 姜景民. 浙江柿天然群体表型多样性研究. 植物研究, 2010, 30(3): 325-331.
- [18] 梁鸣, 张悦, 杨铁华, 徐海军. 槭属植物种子解剖生物学研究. 林业科技, 2007, 32(3): 9-12.
- [19] 王丹, 庞春华, 高亚卉, 郝晓杰, 王玮玲. 茶条槭不同海拔种群的表型多样性. 云南植物研究, 2010, 32(2): 117-125.
- [20] 吴根松, 孙丽丹, 郝瑞杰, 石文芳, 张杰, 陈晶鑫. 梅花种质资源表型多样性研究. 安徽农业科学, 2011, 39(20): 12008-12009, 12012-12012.
- [21] 张冰冰, 宋洪伟, 刘慧涛, 梁英海, 李粤渤. 寒地梨种质资源表型多样性研究. 果树学报, 2009, 26(3): 287-293.
- [22] 庞广昌, 姜冬梅. 群体遗传多样性和数据分析. 林业科学, 1995, 31(6): 543-550.
- [23] 李斌, 顾万春, 卢宝明. 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究. 生物多样性, 2002, 10(2): 181-188.
- [24] 辜云杰, 罗建勋, 吴远伟, 曹小军. 川西云杉天然种群表型多样性. 植物生态学报, 2009, 33(2): 291-301.
- [25] 肖亮, 蒋建雄, 易自力, 艾辛, 覃静萍, 刘树玲, 陈智勇, 林聪. 广西省芒野生居群表型多样性研究. 草业学报, 2013, 22(4): 43-50.
- [26] 宋杰, 李世峰, 刘丽娜, 李树发, 解玮佳, 关文灵. 云南含笑天然居群的表型多样性分析. 西北植物学报, 2013, 33(2): 272-279.
- [27] 李伟, 林富荣, 郑勇奇, 李斌. 皂荚南方天然群体种实表型多样性. 植物生态学报, 2013, 37(1): 61-69.
- [28] 郑昕, 孟超, 姬志峰, 王玮玲. 脱皮榆山西天然居群叶性状表型多样性研究. 园艺学报, 2013, 40(10): 1951-1960.
- [29] 李萍萍, 孟衡玲, 陈军文, 孟珍贵, 李龙根, 杨生超. 云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性. 生态学报, 2012, 32(24): 7747-7756.
- [30] 孟超, 郑昕, 姬志峰, 林丽丽, 张翠琴, 王玮玲. 山西葛萝槭天然种群表型多样性研究. 西北植物学报, 2013, 33(11): 2232-2240.
- [31] 刁松枫, 邵文豪, 姜景民, 董汝湘, 孙洪刚. 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1451-1460.
- [32] 李文英, 顾万春. 蒙古栎天然群体表型多样性研究. 林业科学, 2005, 41(1): 49-56.