

# 不同生境条件下四合木 (*Tetraena mongolica* Maxim.) 种群结构特征

甄江红<sup>1,2</sup>, 刘果厚<sup>2,\*</sup>

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019)

**摘要:**对天然分布区及不同生境内四合木种群的径级结构、年龄结构、冠幅结构、高度结构及空间结构特征进行了比较分析,运用静态生命表描述了四合木种群年龄结构动态变化规律,应用 Clark-Evans 的  $R$  值法计算出四合木个体空间分布格局指标。结果表明:四合木种群径级、龄级与高度级结构均基本呈正态分布,冠幅级结构呈现出近乎指数型的衰减趋势;但不同生境的四合木种群因所处微环境各异,在径级、龄级、高度级、冠幅级结构上表现出一定差异。四合木种群的存活率随龄级的增大而降低,死亡率和消失率随龄级的增大而升高,其存活曲线接近于 Deevey I 型,表明该种群为下降种群。不同生境的四合木种群个体分布均不均匀,其空间分布为随机型。

**关键词:**四合木;种群结构;生境;比较

文章编号:1000-0933(2008)04-1829-13 中图分类号:Q948 文献标识码:A

## Population structure characteristics of *Tetraena mongolica* in different habitats

ZHEN Jiang-Hong<sup>1,2</sup>, LIU Guo-Hou<sup>2,\*</sup>

1 College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China

2 College of Ecology and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1829 ~ 1841.

**Abstract:** *Tetraena mongolica* is an endemic and endangered species, and is one of the Chinese national second protective wild plants being listed in the Red Data book. *T. mongolica* is distributed mainly in Western Ordos Plateau of Inner Mongolia. But for some reasons, the range of the population has been declining. This research was carried out in the natural distribution region and the different habitats of *T. mongolica* population in order to describe the structure and distribution pattern of the population. 7 plots were established and the field data were collected. Through drawing the charts of diameter-class, age-class, width-class, height-class in different habitats, the comparative analyzing was carried out. The dynamic of age structure of *T. mongolica* population was concluded according to the static life table, and the population distribution pattern indexes were calculated by using the method of Clark-Evans. The results showed: (1) The structures of diameter-class, age-class and height-class of *T. mongolica* population were in normal-distribution type. The structure of width-class showed approximate exponential decay. The population structure difference among the different habitats was definitely due to the different micro environments. (2) With the increase of population age-class, the survival rate was decreasing, and the mortality and vanish rate were increasing. The survival curve fitted the Deevey I which indicated the

基金项目:内蒙古自然科学基金资助项目(200711020606)

收稿日期:2007-04-06; 修订日期:2008-01-17

作者简介:甄江红(1970~),女,内蒙古包头市人,博士生,副教授,主要从事区域地理及生态学教学与科研. E-mail: zhenjianghong@sina.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guohouliu@163.com

**Foundation item:** The project was financially supported by Natural Science Foundation of Inner Mongolia(No. 200711020606)

**Received date:** 2007-04-06; **Accepted date:** 2008-01-17

**Biography:** ZHEN Jiang-Hong, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in regional geography and ecology. E-mail: zhenjianghong@sina.com

population was the descending-type. (3) The individual distribution of *T. mongolica* populations in different habitats were not even, and the spatial distribution pattern showed in random.

**Key Words:** *Tetraena mongolica*; population structure; habitats; comparison

四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.)为鄂尔多斯高原所特有的蒺藜科(*Zygophyllaceae*)单种属植物,现呈斑块状残存于西鄂尔多斯荒漠地带面积约2700km<sup>2</sup>的区域内<sup>[1]</sup>,被列为国家二级和内蒙古一级重点保护珍稀植物。因起源古老、抗逆性强,并为生物多样性起源和环境演变研究的理想对象,四合木具有重要的学术价值且倍受关注<sup>[2]</sup>。自20世纪80年代以来相继开展的研究主要表现在分布区及区系特征、解剖学、生物学、生理学、生态学、有性生殖、组织培养、遗传多样性及遗传分化、基因变异、濒危原因、保护途径与范式等诸多方面<sup>①[3,4]</sup>,从而为四合木的系统进化、种质保护和资源利用提供了科学依据。在种群结构与动态方面,张慧荣曾对四合木种群动态进行了分析,表明现存种群为衰退型<sup>[5]</sup>;迟彬等运用Leslie矩阵对其种群动态进行了研究,认为四合木种群有微小波动特点,但在总体上呈衰退趋势<sup>[6]</sup>;徐庆对杭锦旗丘地、黄河滩地、西鄂尔多斯生态保护区及乌海市四合木保护区内的四合木种群结构与动态进行了比较<sup>[7]</sup>;张云飞从年龄结构特征、空间分布格局的变化等方面对部分斑块中四合木种群结构进行了分析<sup>②</sup>,并从空间角度探讨了不同种群的年龄结构、大小结构与开花结实的关系<sup>[8]</sup>。可见,现有成果中缺乏对天然分布区及其所有斑块中四合木种群结构特征差异的比较研究。

研究不同生境条件下濒危植物的种群结构可以揭示种群建立和发展过程中的某些机理,反映植物与环境之间的适合度<sup>[9,10]</sup>,也可为保护措施的制定提供一定的科学依据<sup>[11]</sup>。四合木分布范围狭小,生境条件恶劣,近年来在人类采矿、烧柴、放牧、土地开发及城市化等活动的干扰下,其生境岛屿化现象普遍,分布区面积缩小,种群数量锐减,龄级结构衰退,濒危状况严重。研究四合木种群结构及其空间差异,对于定量描述种群格局并揭示其成因,阐述种群及群落的动态变化,探索种群衰败和致濒的外在因素具有重要意义<sup>[12,13]</sup>。基于此,本文以四合木天然分布及分布区内不同的种群斑块为生境单元对其年龄、大小、空间结构特征进行比较与分析,以期预测群落发展趋势及合理保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区设在西鄂尔多斯高原的四合木天然分布区,其南界与宁夏境内石嘴山市相联,西界受阻于乌兰布和沙漠,北界与库布齐沙漠相邻,东界止于桌子山分水岭,是一个由众多地理阻隔围成的孤岛<sup>①</sup>,地理坐标为106°35′~107°25′E,39°20′~40°15′N<sup>[14]</sup>。据其种群斑块的分布现状,由北至南可划分为乌家庙、桃司兔、千里山、海南、乌达、低山与石嘴山7个种群<sup>[14~16]</sup>②(如图1)。

研究区属温带大陆性气候,冬季寒冷,夏季酷热,干旱少雨,风大沙多,热量丰富。以四合木核心分布区的海勃湾区气候为代表,全年平均日照时数3268.4h;年均气温9.7℃,有效积温3200℃,其中最热月均温25.7℃,最冷月均温-8.3℃;年均无霜期164d;年均降水量139.8mm,年均蒸发量3217.7mm,干燥度4.05;年平均风速3m/s,最大风速28m/s,年8级以上大风日数22d,沙尘、沙暴日数14d。本区属草原化荒漠地带,土壤以灰漠土和棕钙土为主,地表沙化严重<sup>[17~19]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

根据群落调查方法,分别以上述7个种群斑块为调查样区,沿样线每隔100m设置10m×10m的样方1个,其中乌家庙种群20个,桃司兔种群30个,千里山种群20个,乌达种群16个,海南种群30个,低山种群20个,石嘴山种群16个。各样方用GPS定位,记录其经度、纬度和海拔高度,确定其地貌类型、地表组成及土地

① 张云飞. 濒危植物四合木生境破碎化过程中种群动态研究. 武汉大学博士学位论文, 2000.

② 智颖飙. 四合木异地保护生物学基础研究. 内蒙古大学博士学位论文, 2004.

利用状况等生境特点。在取样调查的基础上确定群落类型、植物组成及各组分的优势度;统计四合木的株数,分别用游标卡尺和钢卷尺测定四合木植株的地径、冠幅、株高并量取其个体间距离。

## 2.2 种群结构测定

据徐庆<sup>[7]</sup>建立的四合木年龄  $A$  与地径  $D$  的回归方程:  $A = 0.14 + 0.6709D$  ( $R = 0.9189$ ), 采用所测得的地径数据计算出所调查的 7 个样区中所有四合木的年龄。根据特定时间生命表的编制原理和方法<sup>[11,20~22]</sup>, 计算生命表中各参数, 绘制四合木种群特定时间生命表及其存活曲线。以 5mm 为一径级统计各径级内的株数以确定径级结构; 以 3a 为一龄级统计各龄级内的株数以确定年龄结构; 以  $0.1\text{m}^2$  为一冠幅级统计各冠幅级内的株数以确定冠幅结构; 以 10cm 为一高度级统计各高度级内的株数以确定高度结构<sup>[7,23~27]</sup>; 分别绘制四合木种群径级、龄级、冠幅级、高度级与个体数量分布图, 以分析其种群结构的变化。用 Clark-Evans 的  $R$  值法计算四合木个体空间分布格局指标<sup>[14]</sup>, 计算公式为:

$$R = 2r\sqrt{p}$$

式中,  $r = \sum r_i/n, n = 1, 2, 3, \dots, n$ , 即某一随机株到其邻近株的距离  $r_i$  的平均值;  $p$  为单位面积的植株数。在随机总体中,  $R > 1$ ; 对于集群分布的总体, 应有  $R < 1$ ; 均匀分布的总体中,  $R = 1$ <sup>[14]</sup>。

## 2.3 土样采集与测试

在每个样方的典型地段按 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50cm 5 个层次采集土壤样品, 分析测定土壤含水率、容重、孔隙度及 pH 值等理化指标, 以分析各样区生境条件的差异。各种群斑块的群落及生境特征<sup>[7,18,28,29]</sup>见表 1。

## 2.4 主要参数定义

本文所涉及的主要参数定义如下:

地径 四合木主干离地面 10cm 处植株的直径;

冠幅 经过株冠中心点的两个直径的乘积;

株高 通过四合木株冠中心点的自然垂直高度。

个体间距离 相邻两株四合木株冠中心点间的距离。

## 3 结果分析

### 3.1 四合木种群的径级结构

径级是表征四合木个体年龄和大小的主要指标。分别以四合木天然分布区内所有取样及各种群斑块中所有取样为整体, 以径级为横坐标, 各径级个体数占植株总数的百分比为纵坐标, 绘制出天然分布区及不同生境内的四合木种群径级结构图(图 2、图 3), 以比较、分析四合木种群的径级结构及其差异。

#### 3.1.1 天然分布区内四合木种群的径级结构

由图 2 可知, 天然分布区内四合木种群的径级结构近似于正态分布, 即从 1 径级(0~5mm)开始, 其数量随径级增加而迅速增加, 3 径级(10~15mm)达到峰值以后, 又随径级增加逐步减少, 表现出小径级和大径级的植株个体数目较少, 中间径级的植株数目较多的变化趋势。其中以 2~7 径级(5~35mm)的植株个体数目

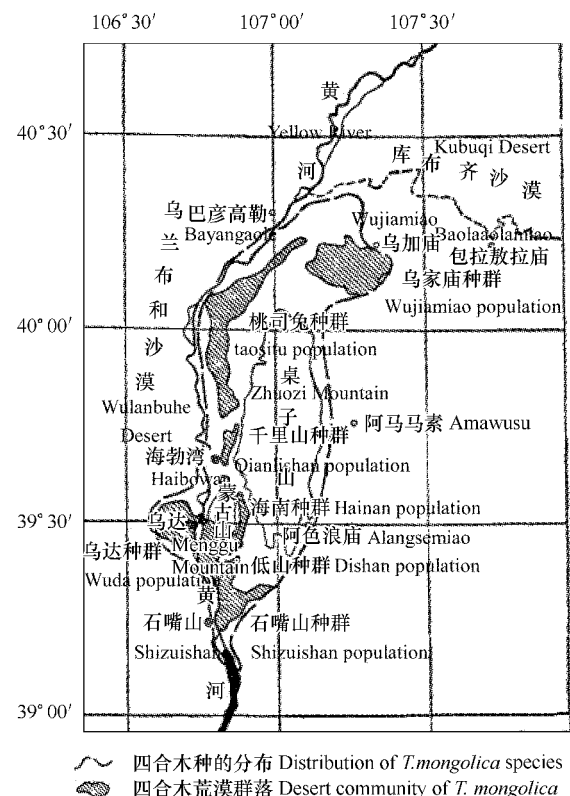


图 1 四合木分布区<sup>[29]</sup>  
Fig. 1 Distribution regions of *Tetraena mongolica*

表 1 四合木天然分布区内群落与生境类型及其特征  
Table 1 Community and habitat characteristics of *Tetraena mongolica* populations in the natural distribution area

| 样地<br>Plot                        | 地理位置<br>Location                       | 海拔<br>Altitude<br>(m) | 生境类型<br>及特点<br>Habitat<br>types and<br>characteristics | 土壤类型及性质 Soil types and characteristic |                              |                                |                                                    |                                |                     | 群落类型<br>Community<br>types                  | 群落盖度<br>Community<br>coverage<br>(%) | 植物组成<br>Plant composing                              |
|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                   |                                        |                       |                                                        | 类型<br>Types                           | 土层<br>Soil<br>layers<br>(cm) | 含水率<br>Water<br>content<br>(%) | 容重<br>Soil bulk<br>density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙度<br>Soil<br>porosity<br>(%) | pH 值<br>pH<br>value |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       |                                                        |                                       |                              |                                |                                                    |                                |                     |                                             |                                      |                                                      |
| 乌家庙种群<br>Wujiamiao<br>population  | 107°06′ ~ 107°24′E<br>40°06′ ~ 40°15′N | 1211 ~ 1320           | 切割严重的                                                  | 灰漠土                                   | 0 ~ 10                       | 1.184                          | 1.594                                              | 45.50                          | 8.945               | 四合木-<br>超旱生灌<br>木-小半<br>灌木荒漠 <sup>(7)</sup> | 20 ~ 40                              | 四合木、绵刺、长叶红砂、<br>红砂、狭叶锦鸡儿、霸王、<br>驼绒藜及针茅等丛生禾<br>草      |
|                                   |                                        |                       | 洪积台地或                                                  | Gray                                  | 10 ~ 20                      | 1.853                          | 1.395                                              | 47.26                          | 8.855               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 高平原，                                                   | desert                                | 20 ~ 30                      | 2.639                          | 1.453                                              | 43.83                          | 8.865               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 地表覆沙，                                                  | soil                                  | 30 ~ 40                      | 3.231                          | 1.399                                              | 53.42                          | 8.970               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 土壤沙质 <sup>(1)</sup>                                    |                                       | 40 ~ 50                      | 3.135                          | 1.415                                              | 52.05                          | 9.140               |                                             |                                      |                                                      |
| 桃司兔种群<br>Taositu<br>population    | 106°47′ ~ 107°06′E<br>39°46′ ~ 40°15′N | 1080 ~ 1181           | 洪积台地或高平                                                | 沙化灰漠土                                 | 0 ~ 10                       | 1.057                          | 1.593                                              | 46.00                          | 8.980               | 四合木-超旱<br>生灌木-小半<br>灌木荒漠 <sup>(7)</sup>     | 10 ~ 40                              | 四合木、霸王、白刺、绵<br>刺、沙冬青、红砂、珍珠、<br>刺叶柄棘豆及针茅、隐子<br>草等丛生禾草 |
|                                   |                                        |                       | 原，地表有砾幕层                                               | Sandy gray                            | 10 ~ 20                      | 1.494                          | 1.628                                              | 44.84                          | 9.059               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 或细沙，土壤沙砾                                               | desert soil                           | 20 ~ 30                      | 1.708                          | 1.577                                              | 45.53                          | 9.267               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 质 <sup>(2)</sup>                                       |                                       | 30 ~ 40                      | 1.973                          | 1.584                                              | 45.26                          | 9.371               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       |                                                        |                                       | 40 ~ 50                      | 2.750                          | 1.553                                              | 46.30                          | 9.538               |                                             |                                      |                                                      |
| 千里山种群<br>Qianlishan<br>population | 106°49′ ~ 106°53′E<br>39°39′ ~ 39°45′N | 1175 ~ 1400           | 石质低山或山前                                                | 灰漠土                                   | 0 ~ 10                       | 0.920                          | 1.583                                              | 46.79                          | 8.835               | 四合木-小半<br>灌木荒漠 <sup>(8)</sup>               | 10 ~ 30                              | 四合木、红砂、珍珠、刺叶<br>柄棘豆及针茅等丛生禾<br>草                      |
|                                   |                                        |                       | 倾斜平原，地表有                                               | Gray desert                           | 10 ~ 20                      | 1.148                          | 1.595                                              | 44.16                          | 8.890               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 砾石或覆沙，土壤                                               | soil                                  | 20 ~ 30                      | 1.196                          | 1.565                                              | 46.68                          | 8.615               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 沙砾质 <sup>(3)</sup>                                     |                                       | 30 ~ 40                      | 1.378                          | 1.614                                              | 50.20                          | 8.715               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       |                                                        |                                       | 40 ~ 50                      | 1.483                          | 1.626                                              | 38.51                          | 8.880               |                                             |                                      |                                                      |
| 乌达种群<br>Wuda<br>population        | 106°37′ ~ 106°47′E<br>39°26′ ~ 39°33′N | 1169 ~ 1300           | 石质丘陵或黄河                                                | 沙化灰漠土                                 | 0 ~ 10                       | 1.005                          | 1.704                                              | 43.76                          | 8.690               | 四合木-超旱<br>生小灌木-小半<br>灌木荒漠 <sup>(9)</sup>    | 10 ~ 20                              | 四合木、红砂、霸王、半日<br>花、内蒙古旱蒿、冷蒿及<br>蓝刺头等草本植物              |
|                                   |                                        |                       | 冲积平原，地表有                                               | Sandy gray                            | 10 ~ 20                      | 0.967                          | 1.602                                              | 40.70                          | 8.955               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 砾石、覆沙和粉煤                                               | desert soil                           | 20 ~ 30                      | 1.241                          | 1.553                                              | 47.36                          | 8.405               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 灰，土壤沙砾                                                 |                                       | 30 ~ 40                      | 1.227                          | 1.522                                              | 47.90                          | 9.235               |                                             |                                      |                                                      |
|                                   |                                        |                       | 质 <sup>(4)</sup>                                       |                                       | 40 ~ 50                      | 1.140                          | 1.440                                              | 49.62                          | 9.220               |                                             |                                      |                                                      |

续表

| 样地<br>Plot                        | 地理位置<br>Location                       | 海拔<br>Altitude<br>(m) | 生境类型                                           |              | 土壤类型及性质 Soil types and characteristic |                                |                                                    |                                |                     |                                              |         | 群落类型<br>Community<br>types                         | 群落盖度<br>Community<br>coverage<br>(%) | 植物组成<br>Plant composing |
|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
|                                   |                                        |                       | 及特点<br>Habitat<br>types and<br>characteristics | 类型<br>Types  | 土层<br>Soil<br>layers<br>(cm)          | 含水率<br>Water<br>content<br>(%) | 容重<br>Soil bulk<br>density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙度<br>Soil<br>porosity<br>(%) | pH 值<br>pH<br>value |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
| 海南种群<br>Hainan<br>population      | 106°44' ~ 106°54'E<br>39°24' ~ 39°35'N | 1285 ~ 1325           | 山前倾斜平原或                                        | 棕钙土          | 0 ~ 10                                | 1.342                          | 1.466                                              | 51.24                          | 8.763               | 四合木-盐柴<br>类小半灌木-丛<br>生禾草荒漠 <sup>(10)</sup>   | 20 ~ 40 | 四合木、珍珠、红砂及隐<br>子草、针茅、银灰旋花等<br>丛生禾草                 |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 山间台地,地表有                                       | Brown        | 10 ~ 20                               | 1.914                          | 1.479                                              | 48.96                          | 8.618               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 砾石或薄层覆沙,                                       | calcium soil | 20 ~ 30                               | 2.707                          | 1.439                                              | 50.78                          | 8.640               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 土壤沙砾质 <sup>(5)</sup>                           |              | 30 ~ 40                               | 2.466                          | 1.431                                              | 50.82                          | 8.555               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
| 低山种群<br>Dishan<br>population      | 106°44' ~ 106°53'E<br>39°20' ~ 39°24'N | 1144 ~ 1400           | 石质低山、丘陵或                                       | 棕钙土          | 0 ~ 10                                | 0.831                          | 1.513                                              | 50.10                          | 9.100               | 四合木-丛<br>生禾草荒<br>漠 <sup>(11)</sup>           | 20 ~ 40 | 四合木、绵刺、刺叶柄棘<br>豆、狭叶锦鸡儿及草霸<br>王、蒙古葱、隐子草、针茅<br>等丛生禾草 |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 山前倾斜平原,地                                       | Brown        | 10 ~ 20                               | 3.759                          | 1.607                                              | 44.58                          | 8.985               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 表有砾石或覆沙,                                       | calcium soil | 20 ~ 30                               | 5.338                          | 1.493                                              | 42.57                          | 8.970               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 土壤沙砾质 <sup>(3)</sup>                           |              | 30 ~ 40                               | 11.208                         | 1.616                                              | 41.96                          | 9.130               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
| 石嘴山种群<br>Shizu-shan<br>population | 106°47' ~ 106°59'E<br>39°13' ~ 39°20'N | 1115 ~ 1400           | 山前洪积台地、倾                                       | 棕钙土          | 0 ~ 10                                | 2.023                          | 1.583                                              | 45.18                          | 8.878               | 四合木-超旱<br>生小灌木-小<br>半灌木荒<br>漠 <sup>(9)</sup> | 15 ~ 30 | 四合木、红砂、半日花、珍<br>珠、绵刺、刺旋花、刺叶柄<br>棘豆及草霸王、针茅等丛<br>生禾草 |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 斜平原或石质低                                        | Brown        | 10 ~ 20                               | 2.298                          | 1.536                                              | 49.58                          | 8.910               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 山、丘陵,地表坚                                       | calcium soil | 20 ~ 30                               | 2.150                          | 1.544                                              | 46.90                          | 8.843               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 实且多砾石,土壤                                       |              | 30 ~ 40                               | 1.745                          | 1.555                                              | 44.32                          | 8.955               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |
|                                   |                                        |                       | 砾石质 <sup>(6)</sup>                             |              | 40 ~ 50                               | 2.102                          | 1.528                                              | 44.41                          | 9.043               |                                              |         |                                                    |                                      |                         |

(1) Pluvial terrace and high plain which were cut intensely, sand covering the ground surface, soil sandiness; (2) Pluvial terraces and high plain, gravel and silver sand covering the ground surface, sandy-gravel soil type; (3) Lithoid hills and piedmont clinoplain, gravel and sand covering the ground surface, sandy-gravel soil type; (4) Lithoid hills and the Yellow River flood plain, sandy-gravel and fly ash covering the ground surface, sandy-gravel soil type; (5) Piedmont clinoplain and intermontane mesa, gravel and thin sand covering the ground surface, sandy-gravel soil type; (6) Piedmont pluvial terraces, clinoplain and lithoid hills, the ground surface was hardness and gravelly, gravel soil type; (7) *T. mongolica*-super xerophytic shrubs-small semishrub desert; (8) *T. mongolica*-small semishrub desert; (9) *T. mongolica*-super xerophytic small shrubs-small semishrub desert; (10) *T. mongolica*-halophyte small semishrubs-rosettegrass desert; (11) *T. mongolica*-rosettegrass desert

绵刺 *Potanuria mongolica*, 长叶红砂 *Reaumuria trigyna*, 红砂 *Reaumuria soongorica*, 狭叶锦鸡儿 *Caragana stenophylla*, 霸王 *Zygophyllum xanthoxylon*, 骆驼刺 *Ceratoides latens*, 沙生针茅 *Stipa glareosa*, 针茅 *Stipa* sp., 短花针茅 *Stipob reitflora*, 白刺 *Nitraria tangutorum*, 沙冬青 *Ammodendron mongolicum*, 珍珠 *Salsola passerina*, 刺叶柄棘豆 *Oxytropis aciphylla*, 隐子草 *Cleistogenes* sp., 半日花 *Helianthemum soongoricum*, 内蒙古旱蒿 *Artemisia xerophytica*, 冷蒿 *Artemisia frigida*, 蓝刺头 *Echinops latifolius*, 银灰旋花 *Convolvulus ammannii*, 沙蒿 *Artemisia desertorum*, 草霸王 *Zygophyllum mucronatum*, 蒙古葱 *Allium mongolicum*, 刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides* Turcz

目居多,其数量占四合木总数的 93.42%;1 径级以下(小于 5mm)与 8 径级以上(大于 35mm)的植株数目分布最少,分别占四合木总数的 2.31% 和 4.27%。在各径级中,又以 3 径级(10~15mm)的个体数量最多(占 23.31%),其次为 4 径级(15~20mm)与 5 径级(20~25mm),分别占 20.46% 和 19.75%,而 11 径级(50~55mm)及其以上的个体数量最少,仅占总株数的 0.36%。

### 3.1.2 不同生境四合木种群的径级结构变化

图 3 表明不同生境的四合木种群由于所处微环境各异,在径级结构上表现出一定差异,但均有中间径级的植株数目分布较多,小径级和大径级的植株个体数目相对较少的变化趋势。其中均以 2~7 径级的植株数目最多,其数量占四合木总株数的 88.64%~97.22%,1 径级以下与 8 径级以上的植株数目最少,分别占 1.27%~9.09% 和 1.56%~8.47%。桃司兔、低山、海南、千里山种群从 1 径级开始,四合木个体数量随径级增加而迅速增加,3 径级达到峰值以后,又随径级增加在波动中逐渐减少;石嘴山种群从 1 径级开始,四合木个体数量随径级增加而增加,4 径级达到峰值以后,又随径级增加快速减少,7 径级以上几乎未见四合木个体;乌达种群中 1 径级的四合木个体数目最多,占总株数的 9.09%,表明其当年生幼苗较多,但 2 径级的幼苗死亡率较高,使其比重降至 4.55%,这很可能与该区的煤矿采挖与工矿发展及由此带来的大量粉煤灰与工业污染有关,2 径级以后,四合木个体数量又随径级增加而大幅增加,分别于 3 径级与 5 径级达到峰值后,又随径级增加迅速减少;乌家庙种群因地表覆沙较厚,使四合木因种子小(千粒质量平均为  $1.112\text{g}^{[7]}$ )而不易萌发,故种群内无当年生苗,表现为 1 径级的个体数目为 0,而四合木数量随径级变化的曲线较其它生境中径级结构曲线整体右移,表明其个体与年龄均较大,生境条件较为适宜。

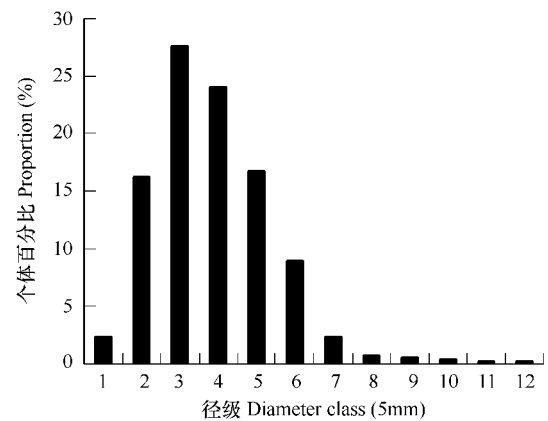


图 2 四合木种群径级结构变化

Fig. 2 Diameter-class structure of the *T. mongolica* population

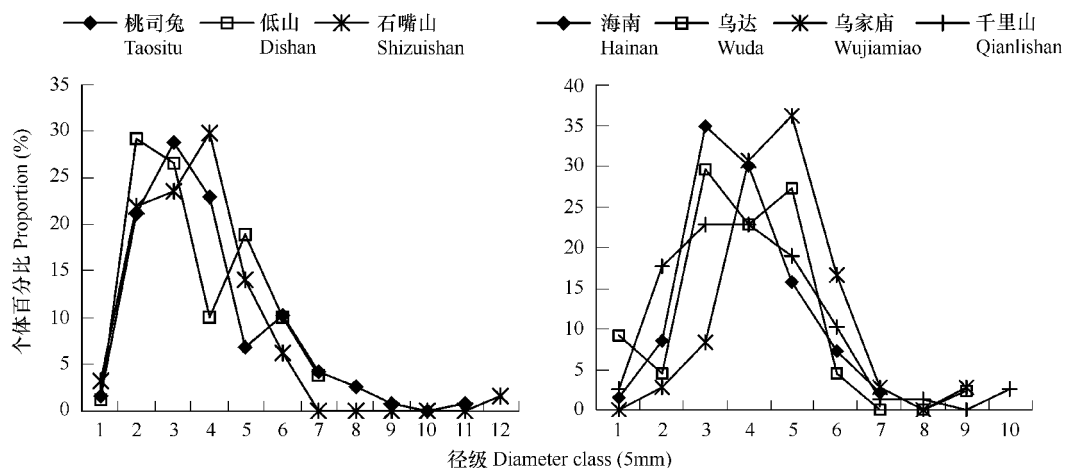


图 3 不同生境四合木种群径级结构变化

Fig. 3 Diameter-class structures of the *T. mongolica* populations in different habitats

### 3.2 四合木种群的年龄结构

大量野外调查发现,3a 以内四合木植株均未开花结实。据此,以 3a 为 1 龄级<sup>[7]</sup>,统计出每一龄级所对应的所有四合木的个体数量(表 2),以龄级为横坐标,各龄级个体数所占比例为纵坐标,分别绘制出天然分布区及各生境内的四合木种群年龄结构图(图 4、图 5)。

表 2 四合木种群年龄结构分布表  
Table 2 Age structure of *Tetraena mongolica* population

| 年龄级<br>Age-class | 个体数<br>Individual<br>number | 所占比例<br>Percentage<br>(%) | 年龄级<br>Age-class | 个体数<br>Individual<br>number | 所占比例<br>Percentage<br>(%) | 年龄级<br>Age-class | 个体数<br>Individual<br>number | 所占比例<br>Percentage<br>(%) |
|------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1                | 12                          | 2.14                      | 6                | 82                          | 14.59                     | 11               | 3                           | 0.53                      |
| 2                | 52                          | 9.25                      | 7                | 45                          | 8.01                      | 12               | 1                           | 0.18                      |
| 3                | 100                         | 17.79                     | 8                | 34                          | 6.05                      | 13               | 4                           | 0.71                      |
| 4                | 116                         | 20.64                     | 9                | 8                           | 1.42                      | 总计 Total         | 562                         | 100                       |
| 5                | 101                         | 17.97                     | 10               | 4                           | 0.71                      |                  |                             |                           |

### 3.2.1 天然分布区内四合木种群的年龄结构

从表 2 和图 4 中均可看出,四合木种群的幼龄与老龄个体均很少,个体数量峰值出现于近中等龄级。其中,10a 以下的个体数占 29.18%,20a 以上的个体数占 9.61%,10~20a 的个体数占 61.21%,表明现实种群年龄结构为典型的“凸”型,出现衰退趋势。在各龄级中,又以 4 龄级(10~12a)的个体数量最多(占 20.64%),其次为 5 龄级(13~15a)和 3 龄级(7~9a),分别占 17.97%和 17.79%,而 12 龄级(34~36a)的个体数量最少,仅占总株数的 0.18%。

### 3.2.2 天然分布区内四合木种群年龄结构动态变化

为进一步分析四合木种群的动态,最常用和最直观的方法是根据生命表绘制存活曲线,而静态生命表是种

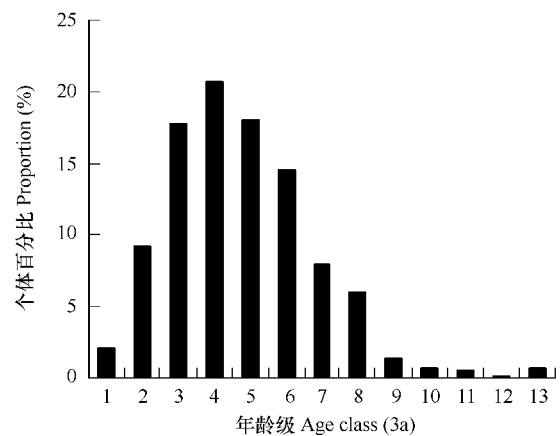


图 4 四合木种群年龄结构变化

Fig. 4 Age-class structure of the *T. mongolica* population

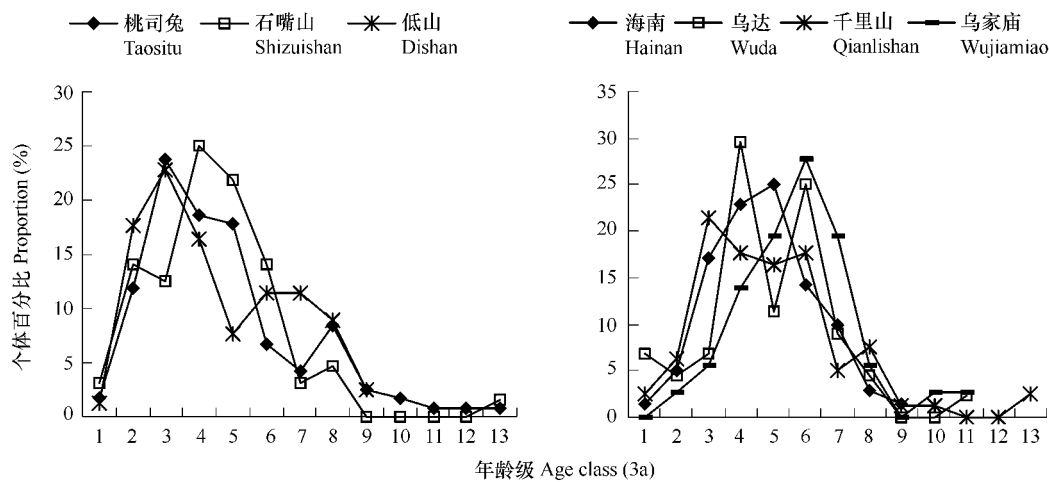


图 5 不同生境四合木种群年龄结构变化

Fig. 5 Age-class structures of the *T. mongolica* populations in different habitats

群动态分析的一种强有力的手段<sup>[7,11,21~23]</sup>。为此,以天然分布区内所调查的所有四合木年龄为整体编制种群生命表<sup>[7,20]</sup>,如表 3 所示,并据此绘制出四合木种群的存活曲线(图 6)。

由表 3 可以看出四合木种群在 36a 内的死亡( $q_x$ )趋势:四合木种群在 0~6a 的死亡率最低, $q_x$  仅为 0.0215~0.0952,这是由于该龄级的个体处于未成熟阶段,根幅、冠幅较小,个体间的水分、光照及养分竞争不激烈,环境压力不大( $K_x=0.0217\sim0.1001$ )所致;7~21a,四合木种群处于青年期和壮年期,因个体对营养空间的需求达到最大,四合木的根系及地上部分与其他植物的生态位发生重叠,群落内水分、养分和空间等因子

已不能充分满足其要求,植株间竞争非常激烈,自疏和他疏作用增强,个体间的分化现象严重,导致死亡率升高,环境的选择压力增大;22~24a,四合木种群处于晩年期,其植株本身在生理上发生一些变化,器官在衰老,木质部组织坏死,竞争弱的四合木因缺水大量死亡,此时的死亡率高达0.68,环境的选择压力迅速增至最大值1;24a以后,死亡率、环境的选择压力虽然出现小的波动,但仍然保持在死亡高峰期,32a时,死亡率达最高值0.75。从死亡动态可以初步认为四合木种群的生理年龄为24~32a之间。表3表明,四合木种群的存活率随龄级的增加在降低,而死亡率、消失率随龄级的增加基本处于上升趋势。四合木种群的存活曲线接近于Deevey I型存活曲线(图6),进一步表明该种群为下降种群。

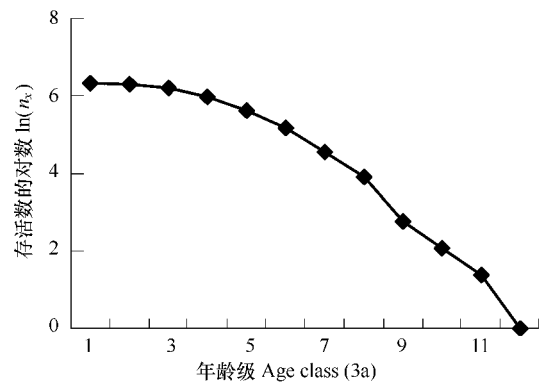


图6 四合木种群的存活曲线

Fig. 6 Survival curve of the *T. mongolica* population

表3 四合木种群静态生命表

Table 3 Static life table of *Tetraena mongolica* population

| 年龄<br>Age<br>$x$ | 存活数<br>Survival number<br>$n_x$ | 存活率<br>Survival rate<br>$l_x$ | 死亡数<br>Death number<br>$d_x$ | 死亡率<br>Mortality rate<br>$l_x$ | 区间寿命<br>Span life<br>$L_x$ | 总寿命<br>Total life<br>$T_x$ | 消失率<br>Vanish rate<br>$K_x$ |
|------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 2                | 558                             | 1                             | 12                           | 0.0215                         | 552                        | 2342                       | 0.0217                      |
| 5                | 546                             | 0.9785                        | 52                           | 0.0952                         | 520                        | 1790                       | 0.1001                      |
| 8                | 494                             | 0.8853                        | 100                          | 0.2024                         | 444                        | 1270                       | 0.2262                      |
| 11               | 394                             | 0.7061                        | 116                          | 0.2944                         | 336                        | 826                        | 0.3487                      |
| 14               | 278                             | 0.4982                        | 101                          | 0.3633                         | 227.5                      | 490                        | 0.4515                      |
| 17               | 177                             | 0.3172                        | 82                           | 0.4633                         | 136                        | 262.5                      | 0.6223                      |
| 20               | 95                              | 0.1703                        | 45                           | 0.4737                         | 72.5                       | 126.5                      | 0.6419                      |
| 23               | 50                              | 0.0896                        | 34                           | 0.68                           | 33                         | 54                         | 1                           |
| 26               | 16                              | 0.0287                        | 8                            | 0.5                            | 12                         | 21                         | 0.6931                      |
| 29               | 8                               | 0.0143                        | 4                            | 0.5                            | 6                          | 9                          | 0.6931                      |
| 32               | 4                               | 0.0072                        | 3                            | 0.75                           | 2.5                        | 3                          | 1                           |
| 35               | 1                               | 0.0018                        |                              |                                | 0.5                        | 0.5                        | 1                           |

### 3.2.3 不同生境四合木种群的年龄结构变化

由图5可知,除低山种群外,各生境中四合木种群的年龄结构均表现出幼龄与老年个体数目很少,中等龄级个体数目较多的共同特征。其中,桃司兔、石嘴山、海南、千里山、乌家庙种群的四合木年龄结构近似于典型的正态分布,中等龄级(3~7龄级)的四合木个体数占71.19%~89.28%,均属于衰退型种群。但因所处生境的差异,其曲线峰值及种群衰退程度亦有差别。其中,桃司兔与千里山种群的个体数目峰值均出现于3龄级,低于其它种群,为缓慢衰退型;石嘴山种群的个体数目峰值出现于4龄级,海南种群出现于5龄级;乌家庙种群个体数目峰值出现于6龄级,高于其它种群,为快速衰退型。低山与乌达种群近似于双峰曲线,分别于3龄级与6、7龄级,4龄级与6龄级达到峰值,其间5龄级个体数目均为最低值。在各类生境中,低山种群的幼龄(1~2龄级)个体所占比重最大(18.99%),这与其土壤含水率较高(0~50cm为6.044%),覆沙厚度较薄,具有适合四合木种子萌发的生境条件有关;但从群落外貌上看,低山种群中四合木的盖度最大,个体间的平均距离仅2m左右,水分与养分等环境资源已被四合木充分利用,只有当老龄个体死亡后方有空余的资源空间供幼苗进行补充更新,因而更新较为缓慢,仍属衰退型种群。

### 3.3 四合木种群的冠幅结构

以冠幅级为横坐标,各冠幅级全部个体数所占的百分比为纵坐标,可绘制出天然分布区及不同生境中四合木种群的冠幅结构图(图7、图8)。

#### 3.3.1 天然分布区内四合木种群的冠幅结构

四合木种群的数量随冠幅级的增加而逐渐减少,呈现出近乎指数型的衰减趋势(指数函数为  $y = 21.28 \times 0.81^x$ ,  $R = 0.9731$ ,  $F = 10.3237 > F(0.01, 1, n-1)$ ),通过0.01的可信度检验)(图7),其中以1~10冠幅级的植株数量最多,比例高达85.67%,即其冠幅面积大多集中在  $0.1 \sim 1.0 \text{ m}^2$  之间。在所调查的所有四合木冠幅中,2冠幅级( $0.1 \sim 0.2 \text{ m}^2$ )的个体数量最多,占15.69%;其次为1冠幅级( $0 \sim 0.1 \text{ m}^2$ ),占15.46%;14冠幅级( $1.3 \sim 1.4 \text{ m}^2$ )的个体数量最少,仅占1.21%。

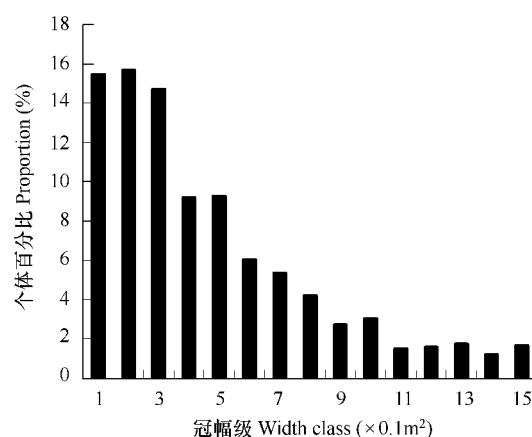


图7 四合木种群冠幅结构变化

Fig. 7 Width-class structure of the *T. mongolica* population

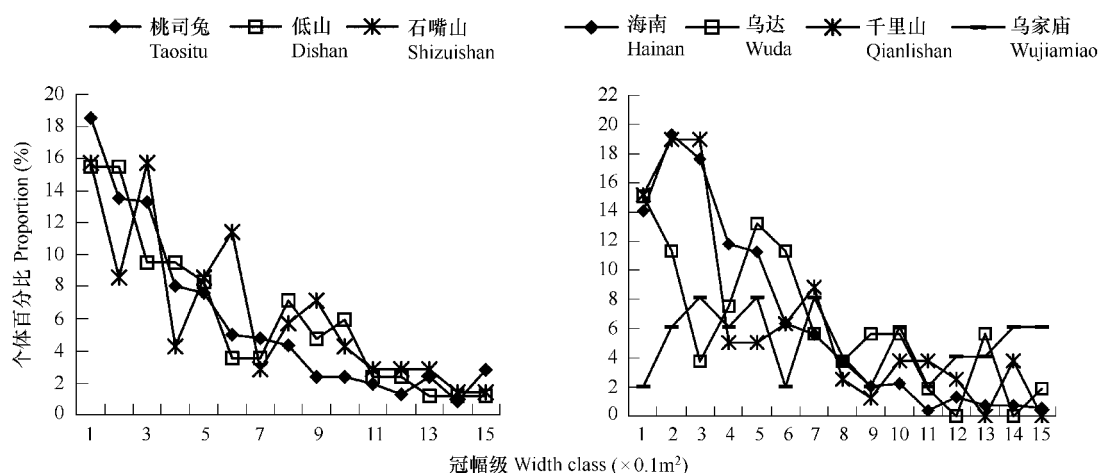


图8 不同生境四合木种群冠幅结构变化

Fig. 8 Width-class structures of the *T. mongolica* populations in different habitats

#### 3.3.2 不同生境四合木种群的冠幅结构变化

由图8可见,除乌家庙种群外,各生境中四合木种群的个体数量随冠幅的增大仍表现出由多到少的递减趋势,其中以桃司兔种群递减速度最快,四合木所占比例由1冠幅级的18.52%降至14冠幅级的0.87%,平均降低21.25倍;海南种群递减速度较慢,由1冠幅级的14.07%降至14冠幅级的0.75%,平均降低18.75倍。各生境中的四合木种群均以1~10冠幅级的植株数目最多,占总株数的79.96%~94.18%。同时,因不同种群所处生境条件的差异,在冠幅结构的变化上亦有不同,其中乌达与石嘴山种群呈现出在波动中缓慢降低的趋势,海南和千里山种群则为先升高又在波动中降低;而乌家庙种群的四合木数量随冠幅级增加而递减的趋势并不明显,其中1、2冠幅级的数量较少,并表现出在波动中略有升高的趋势,1~10冠幅级的植株数量仅占53.06%,说明四合木个体的冠幅均较大且大冠幅的植株个体数目仍然较多,体现出因乌家庙种群的土壤含水率较高、容重低而孔隙度高,使四合木长势好、个体大,生境条件适于其生存发展。

### 3.4 四合木种群的高度结构

以高度级为横坐标,各高度级的全部个体数所占百分比为纵坐标,绘制出天然分布区及不同生境内的四合木种群高度结构图(图9、图10)。

### 3.4.1 天然分布区内四合木种群的高度结构

四合木种群的高度结构表现出两端低、中间高的“山峰型”分布曲线(图9),其中以4高度级(30~40cm)的四合木个体数量最多,占总株数的28.09%,其次为3高度级(20~30cm),占26.05%,10高度级(90~100cm)的四合木个体数量最少,仅占0.30%。四合木株数主要集中于2(10~20cm)~5级(40~50cm)4个高度级上,其间四合木个体比例高达85.69%。

### 3.4.2 不同生境四合木种群的高度结构变化

各样区中四合木种群高度分布规律基本相似(图10),即其个体数量一开始随高度级的增加而增加,到一定程度后,又随高度级的增加而迅速减少,其株数主要集中于2~5高度级,其间四合木比例为65.31%~93.81%,其中乌家庙种群最低,而海南种群最高。石嘴山种群表现为具有2个高峰的“双峰型”曲线;乌家庙

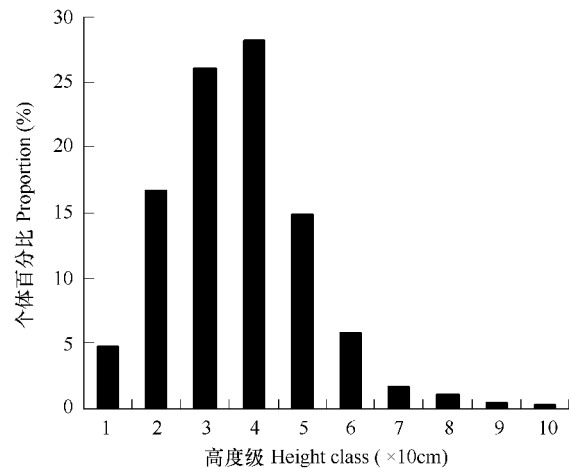


图9 四合木种群高度结构变化

Fig. 9 Height-class structure of the *T. mongolica* population

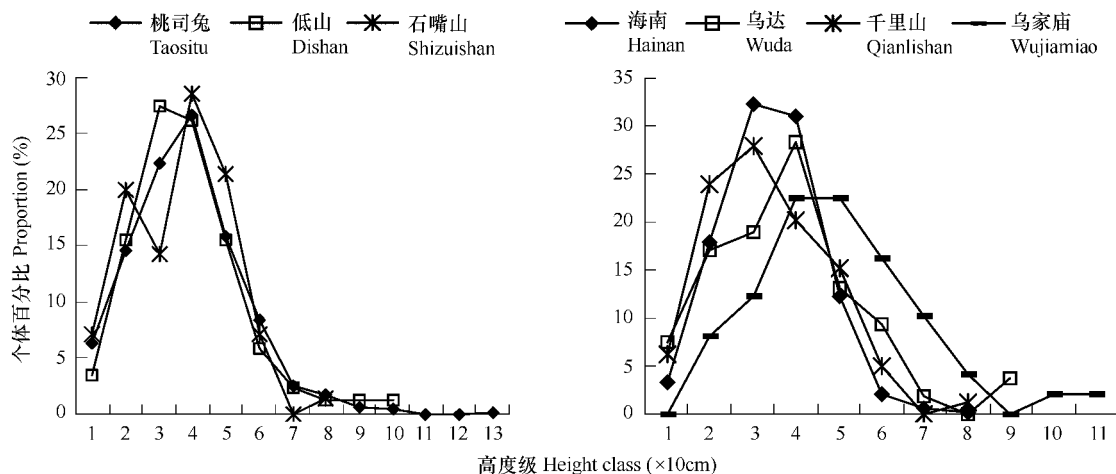


图10 不同生境四合木种群高度结构变化

Fig. 10 Height-class structures of the *T. mongolica* populations in different habitats

种群中缺乏高度0~10cm的四合木个体,说明其种群内部幼苗较少,且其曲线较其它生境中的曲线向右偏移,表明其中四合木个体高度偏大。

### 3.5 四合木种群的空间结构

植物种群的空间分布格局是其生物学特性对环境条件长期适应和选择的结果<sup>[28]</sup>,是种群生存状态的表现指标<sup>[29,30]</sup>。本文采用R值法判断四合木种群个体的分布类型。计算结果表明,不同生境中四合木种群的R值均大于1(表4),这充分说明四合木种群的个体分布具有随机性,不属于集群分布。对其个体间平均距离进行差异显著性检验,发现差异极显著( $F=3.22, P=0.0050$ ),说明个体分布不均匀。由以上分析可知,所有生境类型中四合木个体空间分布为随机型。

## 4 结论与讨论

### 4.1 四合木种群的径级结构

天然分布区及各生境条件下的四合木种群径级结构分布规律相似,都表现为典型的“凸”型特征。其中以2~7径级(5~35mm)的植株个体数目居多,而不同生境的四合木种群因所处的微环境各异,在径级结构上

表现出一定差异,但均有中间径级的植株数目分布较多,小径级与大径级植株个体数目相对较少的变化趋势。其中,乌达种群中 1 径级的四合木株数显著高于其他种群,而乌家庙种群中几乎未见 1 径级的个体,桃司兔、低山、海南、千里山种群以 3 径级的植株个体最多,石嘴山种群的植株个体数目则以 4 径级为峰值。这很可能与局地气候、地形、土壤条件与土地利用方式等区域环境特点有相关关系,反映出生境差异对种群结构的显著影响。

表 4 不同生境四合木种群空间结构特征

Table 4 Spatial structure characteristics of *Tetraena mongolica* populations in different habitats

| 样地<br>Plot       | 种群密度<br>Population density<br>(株/100m <sup>2</sup> ) | 种群盖度<br>Population coverage( % ) | 个体平均面积<br>Mean individual area( m <sup>2</sup> ) | 个体间平均距离<br>Mean individual distance( m ) | 空间分布格局指标<br>Index of space distribution pattern( R ) |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 乌家庙种群 Wujiamiao  | 10                                                   | 10.96                            | 1.47                                             | 2.36                                     | 1.32                                                 |
| 桃司兔种群 Taositu    | 15                                                   | 10.30                            | 0.81                                             | 2.66                                     | 1.99                                                 |
| 千里山种群 Qianlishan | 16                                                   | 7.30                             | 0.54                                             | 1.82                                     | 1.38                                                 |
| 乌达种群 Wuda        | 8                                                    | 5.72                             | 1.02                                             | 2.08                                     | 1.51                                                 |
| 海南种群 Hainan      | 20                                                   | 8.8                              | 0.45                                             | 1.59                                     | 1.18                                                 |
| 低山种群 Dishan      | 21                                                   | 13.91                            | 1.18                                             | 2.02                                     | 1.44                                                 |
| 石嘴山种群 Shizuishan | 14                                                   | 8.09                             | 0.72                                             | 2.09                                     | 1.87                                                 |

## 4.2 四合木种群的龄级结构

(1)天然分布区及各生境中的四合木种群龄级结构均表现出幼龄与老年个体数目很少,中等龄级(10~20a)个体数目较多的正态分布特征,并出现衰退趋势。但因各种群的生境异质性使其龄级结构特征各异。其中,桃司兔与千里山种群属缓慢衰退型,乌家庙种群为快速衰退型,石嘴山与海南种群介于其间,低山种群的龄级结构表现出“双峰型”曲线且以幼龄个体为多,这与其土壤含水率较高,覆沙厚度较薄,具有适合四合木种子萌发的生境条件有关,但有证据表明其更新较为缓慢,仍属衰退型种群。

(2)四合木种群的存活率随龄级的增大而降低,死亡率、消失率随龄级的增大而增高,其存活曲线接近于 Deevey I 型,进一步表明该种群为下降种群。

## 4.3 四合木种群的大小结构

(1)天然分布区及大多生境中四合木种群均以 1~10 冠幅级的植株数目最多,即其冠幅面积大多集中在 0.1~1.0m<sup>2</sup>之间;四合木种群株数随冠幅级的增加逐渐减少,呈现出近指数型的衰减趋势,其中以桃司兔种群递减速度最快,海南种群递减速度较慢,乌达与石嘴山种群具有在波动中缓慢降低的特点,千里山种群则先升高又在波动中逐渐降低,而乌家庙种群中四合木个体数量随冠幅级增加而递减的趋势并不明显,并有在波动中略有升高的趋势,说明其中四合木个体的冠幅均较大及大冠幅的植株个体数目较多,究其原因,可能与其生境中土壤含水率较高、容重低而孔隙度大,生境条件适于其生存发展有关。

(2)天然分布区及各生境中四合木种群高度结构均表现出两端低、中间高的“山峰型”分布曲线,其数量主要集中于 2(10~20cm)~5 级(40~50cm)4 个高度级上,其中乌家庙种群中四合木高度结构变化曲线较其它种群曲线向右偏移,表明其中四合木个体高度偏大,体现出四合木长势较好,生境适于其生存发展的特点。

## 4.3 四合木种群的空间结构

不同生境四合木种群的  $R$  值均大于 1,这说明四合木种群个体分布不均匀,所有生境中其空间分布为随机型,这是种内和种间竞争以及种群与生境相互作用的结果,反映了种群的一种适应机制<sup>[21]</sup>。

综上所述,天然分布区及各生境中四合木种群结构具有相似的变化特征,但不同生境的四合木种群因所处微环境各异,在径级、龄级、高度级与冠幅级结构上表现出一定差异,反映出生境差异对种群结构变化有重要影响,而生境异质性的成因是多方面的,可能是种内及种间竞争,也可能是局地小气候与土壤、土地利用方式等环境条件的变化。研究生境特征及变化原因将有助于探索四合木种群濒危的原因。

## References:

- [ 1 ] Zhang Y F, Yang C, Chen J K. Spatial-temporal change of landscape structure in the distribution region of *Tetraena mongolica*. Journal of Wuhan Botanical Research, 2001, 19(1): 25—30.
- [ 2 ] Ma Y Q, Zhang S Z. A study on system status of *Tetraena mongolica* Maxim. Acta Phytotaxonomy Sinica, 1990, 28(2): 89—95.
- [ 3 ] Ge X J, Yu Y, Zhao N X. Genetic variation in the endangered Inner Mongolia endemic shrub *Tetraena mongolica* Maxim. (Zygophyllaceae). Biological Conservation, 2003, 111(3): 427—434.
- [ 4 ] Schulze E D, Mooney H A. Biodiversity and ecosystem function. Berlin; Springer-Verlag, 1999. 27—63.
- [ 5 ] Zhang H R, Yang C, Ye B. A study on the population structure and dynamics of endangered plant *Tetraena mongolica*. Huhhot: Inner Mongolia University Press, 1995. 89—103.
- [ 6 ] Chi B, An H X, Hao D Y. Study on dynamics of *Tetraena mongolica* Maxim. population with Leslie Matrix. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(2): 77—80.
- [ 7 ] Xu Q, Zang R G, Liu S R. Study on the population structure and dynamics of *Tetraena mongolica* endemic to China. Forest Research, 2000, 13(50): 485—492.
- [ 8 ] Zhang Y F, Yang C, Li B, et al. Interpopulation difference in growth and reproduction of endemic species *Tetraena mongolica* in Ordos Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 436—443.
- [ 9 ] Zhang W H, Wang Y P, Kang Y X, et al. Study on the relationship between *Larix chinensis* populations' s structure and environment factors. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 41—47.
- [ 10 ] Yu Q S, Wang J H, Li C L, et al. A preliminary study on the distribution patterns and characteristics of *Ammopiptanthus Mongolicus* populations in different desert environments. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(4): 591—598.
- [ 11 ] Kang H J, Chen Z L, Liu P. The population structure and distribution pattern of *Emmenopterys henryi* in Dapanshan Natural Reserve of Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 389—396.
- [ 12 ] Wu X P, Zheng Y, Ma K P. Population distribution and dynamics of *Quercus liaotungensis* *Fmxinus rhynchophylla* and *Acer mono* in Dongling Mountain, Beijing. Acta Bot Sin, 2002, 44(2): 212—223.
- [ 13 ] Arista M. The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain. For Ecol Manag, 1995, 74: 81—89.
- [ 14 ] Yang C, Wang Y C, Liu Q, et al. Conservation biology of *Tetraena mongolica* Maxim. Beijing: Science Press, 2002. 1, 88—94, 97—99.
- [ 15 ] Yang C, Zhi Y B, Zheng R. An analysis of ecological adaptability on *Tetraena mongolica* Maxim populations. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 91—96.
- [ 16 ] Zhang T, Wang W, An H J, et al. Relevant analysis on changed population spot and priority protection order of the peculiar endangered plants in eastern Alashan-western Erdos. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 1(5): 179—184.
- [ 17 ] Liu G H, Zhou S Q, Zhang L, et al. Studies on environment and endangered reason of *Tetraena mongolica* endemic in Inner Mongolia. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1993(1): 44—49.
- [ 18 ] Jia Y H, Liu G H, Zhou F D, et al. Study of cutting population of *Tetraena mongolica*. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2006, 27(2): 71—74.
- [ 19 ] Xu Q, Guo Q S, Liu S R, et al. A study on the relationship between fruiting characteristics and reproductive age, habitat of endangered species *Tetraena mongolica*. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(6): 26—32.
- [ 20 ] Li B, Yang C, Lin P. Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2002. 118—122.
- [ 21 ] Zhang W H, Lu Z J, Li J X. A comparative study on spatial distribution pattern and its dynamics of *Quercus variabilis* populations among different forest areas in Shanxi Province, China. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin, 2002, 22(3): 476—483.
- [ 22 ] Song P, Hong W, Wu C Z, et al. Population structure and its dynamics of rare and endangered plant *Alsophila spinulosa*. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 413—418.
- [ 23 ] Dang H S, Jiang M X, Tian Y Q, et al. Population structure and distribution pattern of rare plant communities in Houhe Nature Reserve. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2206—2210.
- [ 24 ] He H B, Zhang H J, Jia G X. Population structure and spatial distribution pattern of *Ammopiptanthus mongolicus* in Deng kou County, Inner Mongolia Autonomous Region. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(10): 13—18.
- [ 25 ] Yang C. Experimentation and exercitation of ecology. Beijing: Higher Education Press, 2003. 160—172.
- [ 26 ] Zhou Z Q, Liu T, Li Y L, et al. The influences of site factors on the inter specific competition between Japanese yew (*Taxus cuspidata*) and other tree species. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2223—2229.

- [27] Liu J F, Jiang Z P, Xiao W F, *et al.* A preliminary study on the population pattern and dynamics of critically endangered plant, *Thuja sutchuenensis* (Cupressaceae). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, 27(5): 708—712.
- [28] Li K C. Soil texture and relative ecological features of *Tetraena mongolica* community distribution areas in Nixia. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2003, 24(1): 25—28.
- [29] Liu Z L. *Vegetation in Inner Mongolia*. Beijing: Science Press, 1985. 687—690.
- [30] Yang H L, Cao Z P, Zhu X W, *et al.* Spatial pattern of *Bromus inermis* (poaceae) in Otindag Sandland, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2765—2773.

#### 参考文献:

- [1] 张云飞, 杨持, 陈家宽. 四合木(*Tetraena mongolica*)分布区景观结构时空变化分析. *武汉植物学研究*, 2001, 19(1): 25~30.
- [2] 马毓泉, 张寿洲. 四合木系统地位的研究. *植物分类学报*, 1990, 28(2): 89~95.
- [5] 张慧荣, 杨持, 叶波. 濒危植物四合木种群结构和动态研究. 见: 李博主编. 草地生物多样性保护研究. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1995. 89~103.
- [6] 迟彬, 安红霞, 郝敦元. 阿拉善荒漠区东部的残遗植物四合木种群动态分析——运用 Leslie 矩阵的讨论. *干旱区资源与环境*, 2000, 14(2): 77~80.
- [7] 徐庆, 臧润国, 刘世荣. 中国特有植物四合木种群结构及动态研究. *林业科学研究*, 2000, 13(50): 485~492.
- [8] 张云飞, 杨持, 李博, 等. 鄂尔多斯高原特有种四合木生长和繁殖的种群间变异与濒危机制. *生态学报*, 2003, 23(2): 436~443.
- [9] 张文辉, 王延平, 康永祥, 等. 太白红杉种群结构与环境的关系. *生态学报*, 2004, 24(1): 41~47.
- [10] 尉秋实, 王继和, 李昌龙, 等. 不同生境条件下沙冬青种群分布格局与特征的初步研究. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 591~598.
- [11] 康华靖, 陈子林, 刘鹏, 等. 大盘山自然保护区香果树种群结构与分布格局. *生态学报*, 2007, 27(1): 389~396.
- [14] 杨持, 王迎春, 刘强, 等. 四合木保护生物学. 北京: 科学出版社, 2002. 1, 88~94, 97~99.
- [15] 杨持, 智颖飙, 征荣. 四合木种群的生态适应性. *生态学报*, 2006, 26(1): 91~96.
- [16] 张韬, 王炜, 安慧君, 等. 东阿拉善-西鄂尔多斯地区特有濒危植物种群斑块变化与优先保护级相关分析. *干旱区资源与环境*, 2005, 1(5): 179~184.
- [17] 刘果厚, 周世权, 张力, 等. 内蒙古特有植物四合木生态环境及濒危原因的研究. *内蒙古林学院学报*, 1993(1): 44~49.
- [18] 贾玉华, 刘果厚, 周峰冬, 等. 四合木扦插繁殖的研究. *内蒙古农业大学学报*, 2006, 27(2): 71~74.
- [19] 徐庆, 郭泉水, 刘世荣, 等. 濒危植物四合木结实特性与植株年龄和生境关系的研究. *林业科学*, 2003, 39(6): 26~32.
- [20] 李博, 杨持, 林鹏. *生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2002. 118~122.
- [21] 张文辉, 卢志军, 李景侠, 等. 陕西不同林区栓皮栎种群空间分布格局及动态的比较研究. *西北植物学报*, 2002, 22(3): 476~483.
- [22] 宋萍, 洪伟, 吴承祯, 等. 珍稀濒危植物桫欏种群结构与动态研究. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 413~418.
- [23] 党海山, 江明喜, 田玉强, 等. 后河自然保护区珍稀植物群落主要种群结构及分布格局研究. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2206~2210.
- [24] 何恒斌, 张惠娟, 贾桂霞. 磴口县沙冬青种群结构和空间分布格局的研究. *林业科学*, 2006, 42(10): 13~18.
- [25] 杨持主编. *生态学试验与实习*. 北京: 高等教育出版社, 2003. 160~172.
- [26] 周志强, 刘彤, 李云灵. 立地条件差异对天然东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)种间竞争的影响. *生态学报*, 2007, 27(6): 2223~2229.
- [27] 刘建锋, 江泽平, 肖文发, 等. 极度濒危植物——崖柏种群空间格局与动态的初步研究. *江西农业大学学报*, 2005, 27(5): 708~712.
- [28] 李克昌. 宁夏四合木群落分布区土壤性质及其相关生态学特性. *宁夏农学院学报*, 2003, 24(1): 25~28.
- [29] 刘钟龄主编. *内蒙古植被*. 北京: 科学出版社, 1985. 687~690.
- [30] 杨慧玲, 曹志平, 朱选伟, 等. 浑善达克沙地无芒雀麦(*Bromus inermis*)空间分布格局. *生态学报*, 2007, 27(7): 2765~2773.