

孑遗植物四合木 (*Tetraena mongolica*) 的濒危肇因与机制

智颖飙^{1,2}, 杨 持³, 王中生^{1,*}, 安树青¹, 王再岚⁴, 李红丽¹, 宿志安⁵, 王 强⁶

(1. 南京大学生命科学院, 南京 210093; 2. 安徽大学生命科学院, 合肥 230039;

3. 内蒙古大学生命科学院, 呼和浩特 010021; 4. 中国人民大学环境学院, 北京 100872;

5. 内蒙古巴彦淖尔市磴口县农业局, 磴口 015200; 6. 西鄂尔多斯国家级自然保护区管理局 乌海 016000)

摘要:对我国特有单属孑遗植物四合木 (*Tetraena mongolica* Maxim) 的地理分布、生境条件、种群数量动态、空间分布格局、种间关系、种群的生命表、生殖力表、有性生殖、无性繁殖和遗传变异等种群生态学特征及其濒危肇因进行了系统分析。研究结果表明:四合木种群为高群集分布,种群曲线属 Leaky 型。年龄结构不合理,其存活曲线接近于 Deevey Ⅱ型,且将演化为小种群,群落内的生境异质性显著,种群处于不稳定阶段。四合木从开花期到结果期,生殖分配 (R_A) 呈下降的趋势,生殖过程中胚胎发生败育、种子向幼苗难以转化使其有性生殖受阻,生活史趋于断裂,是最终导致其濒危的重要内因。分布区城市化、工业化以及过度放牧等原因造成其种群孤立和生境破碎化是物种导致濒危的外因,四合木生态适应性和生境适宜性下降造成遗传多样性逐步丧失。同时提出对我国特有植物四合木进行异地保护的可能性与必然性。

关键词:四合木;孑遗植物;濒危机制;胚胎败育;异地保护

文章编号:1000-0933(2008)02-0767-10 中图分类号:Q145, Q16, Q948, X176 文献标识码:A

The endangered characteristics and mechanism of the endemic relict shrub *Tetraena mongolica* Maxim

ZHI Ying-Biao^{1,2}, YANG Chi³, WANG Zhong-Sheng^{1,*}, AN Shu-Qing¹, WANG Zai-Lan⁴, LI Hong-Li¹, SU Zhi-An⁵, WANG Qiang⁶

1 College of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 School of Life Science, Anhui University, Hefei 230039, China

3 College of Life Science, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

4 School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

5 Agricultural Bureau of Dengkou County of Bayannur City in Inner Mongolia, Dengkou 015200, China

6 Management Bureau of Natural Conservation Region in Western Erdos, Wuhai 016000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0767 ~ 0776.

Abstract: The conservation biological study on the typical endangered plant species of *Tetraena mongolica* Maxim was carried out to examine endangered ecological process and characteristics in China from 1995 through 2006. The paper

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30160020, 30670151); 中国博士后基金资助项目(20060400551)

收稿日期:2006-08-17; **修订日期:**2008-01-21

作者简介:智颖飙(1965~),男,山西五台县人,博士,主要从事种群生态学研究. E-mail: zhiyingbiao@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzs@nju.edu.cn

致谢:内蒙古大学刘钟龄先生和雍世鹏先生对本文写作给予帮助,在此致以诚挚的谢意。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30160020, No. 30670151) and The Postdoctor Science Foundation of China (No. 20060400551)

Received date: 2006-08-17; **Accepted date:** 2008-01-21

Biography: ZHI Ying-Biao, Ph. D., mainly engaged in population ecology. E-mail: zhiyingbiao@gmail.com

reviewed thoroughly the biological characteristics of tendency to endangered status, the geographic distribution, the habitat condition, the population dynamics, and the features of sexual reproduction and asexual propagation of *T. mongolica*. The authors also explained the modeling of the Leslie matrix, time series analysis for predicting population dynamics, fractal theory for describing population distribution pattern, and patterns of endangered population growth. Based on the comprehensive analysis, underlying endangered mechanisms and characteristics of *T. mongolica* were projected. *T. mongolica* distributes in confined west Erdos and the area is shrinking. Age structure indicates a population decline and spatial distribution follows a conglomeration pattern. The adaptation and living abilities demonstrate more weakness than the widespread species such as poorer species competition. The seed yields less and shows impotent. The percentage germination is lower and mortality of seedling higher. On the other hand, asexual propagation only functions limitedly as a kind of compensation after failure of sexual reproduction. In the community context, the favorable influence from other living organisms becomes weaker, whereas, the unfavorable influence stronger in natural situations as the result of disturbed ecological balance and reduced biodiversity. The endangered population of *T. mongolica* revealed a declining status with predicting model analysis. That eventually dues to both the internal factors, such as embryogenesis abortion, and feeble abilities of living, external factors such as and disturbances as well. Moreover, tougher disturbances would turn to the vital reason for *T. mongolica* to go extinct. In summary, the above endangered characteristics have accorded with the approved standards of *ex situ* conservation of relict plants. Therefore, *T. mongolica* should be protected with sufficient support of research.

Key Words: *Tetraena mongolica*; relict species; endangered mechanism; embryogenesis abortion; *ex situ* conservation

在过去的 2 亿年中,高等植物灭绝的“背景速率(background rate)”是每世纪约为 4 种^[1,2]。20 世纪 90 年代以来,我国稀有濒危植物保护生物学研究分别从种群生态学、生殖生物学和遗传多样性 3 个方面研究濒危植物的种群空间结构、种间关联、年龄结构等动态分析和预测,探索和阐明植物濒危机理和保护对策,取得了丰硕成果^[3]。推动了传粉生态学、种群生态学、生殖生物学、遗传多样性和保护生物学的发展^[4]。

西鄂尔多斯地区作为我国西部草原化荒漠区的一个特殊区域,这里因集中分布着数种珍稀濒危植物如四合木(*Tetraena mongolica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、绵刺(*Potania mongolica*)、半日花(*Helianthemum soongaricum*)、长叶红砂(*Reanmura trigyna*)、革苞菊(*Tugarinovia mongolica*)、蒙古扁桃(*Prunus mongolica*)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等而备受关注^[5]。其中四合木为蒺藜科一个单种属的古地中海孑遗植物,我国特有和狭域分布种,国家二级珍稀濒危植物,内蒙古自治区唯一特有属植物,中国生物多样性保护的优先保护植物。全世界仅在亚洲中部荒漠区的西鄂尔多斯高原有少量分布。它的存在不仅在植物区系及系统演化上重要地位,在生态环境保护上也具有很大价值。从 1995 年开始,对其进行了种群脆弱性分析、濒危种群进化潜能分析、传粉生物学及其传粉昆虫的研究、西鄂尔多斯古老残遗物种生活史适应机制和西鄂尔多斯地区的生境适宜性特征研究^[6~14]。但对濒危植物四合木的濒危机理和生态学过程的综合分析研究较少,因此从四合木生境适宜性和生态适应性方面廓清其濒危肇因和机理,以期为了孑遗植物四合木以及其它濒危植物保护生物学研究提供理论指导。

1 四合木濒危的主要特征

四合木为狭域地理分布种($106^{\circ}35' \sim 107^{\circ}25'E, 39^{\circ}2' \sim 40^{\circ}15'N$)(图 1)^[5],空间分布呈聚集型。种子向幼苗的转化困难,生存力和适应力较差,种群数量处于衰退中(图 2)^[12,13]。

1.1 四合木为狭域分布种,且地理分布范围不断收缩

四合木主要分布在鄂尔多斯高原西北部,库布齐沙漠以南,乌兰布和沙漠以东,桌子山的山麓地带,分布面积为 2774 km^2 ^[5,12]。在 1988~1995 的 7a 间,四合木斑块面积由 1739.27 km^2 递减为 1501.05 km^2 ,而白刺(*Nitraria tangutorum*)斑块面积由 40.55 km^2 增加为 72.96 km^2 。同时,工矿区和沙地的面积增加迅速,沙漠化

过程逐步加剧^[15]。四合木分布区内,地表状况从石质、砾质到沙质均有分布^[16]。由于斑块总面积的减少和斑块数目的增加,导致了四合木平均斑块面积的缩小,如以目前的递减速率,四合木在本类型区内将在 16.6a 后消失^[13~15]。

1.2 种群年龄结构为衰退型,空间分布为聚集型

四合木种群年龄结构呈衰退趋势。由于不同种群的年龄结构存在差异,也使不同种群的动态表现的不一致,在生殖年龄、更新以及年龄结构动态上都产生差异^[17]。四合木种群的生殖值从低龄组到高龄组,呈现出一种低→高→低的趋势。四合木的生殖值受环境因子的选择压力(kx)以及种群存活率(Lx)所控制。生殖分配(RA)与生殖阶段有关,从花期到果期, RA 呈下降的趋势^[29]。这与对大头茶(*Cordia acuminata*)的研究结果相似^[18]。

Leak^[13]指出,植物种群双对数化的存活曲线若为一条直线,则表示该种群是稳定种群;若为“凹型”则为增长种群;若为“凸型”则为下降种群。并且稳定种群和增长种群的存活曲线符合负幂函数分布,而下降种群的存活曲线不符合负幂函数分布^[13]。四合木种群生命表和存活曲线表明,四合木种群曲线属 Leak 凸型,说明该种群为下降种群。四合木种群株数随径级、高度级的变化呈“山峰型”,植株数随冠幅级变化成倒“J”型,而现实的四合木种群曲线属 Leak 凸型,说明该种群为下降种群。四合木种群的死亡率 q_x 、致死力 k_x 随龄级增大而增高,存活率 l_x 随龄级增大而降低^[13]。

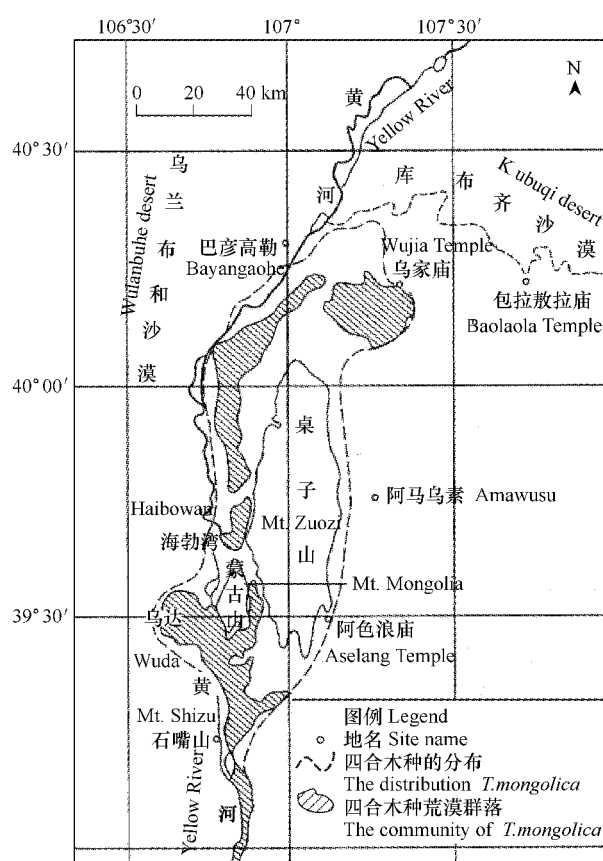


图1 四合木分布区^[5]

Fig. 1 The distributive area of *T. mongolica*^[5]

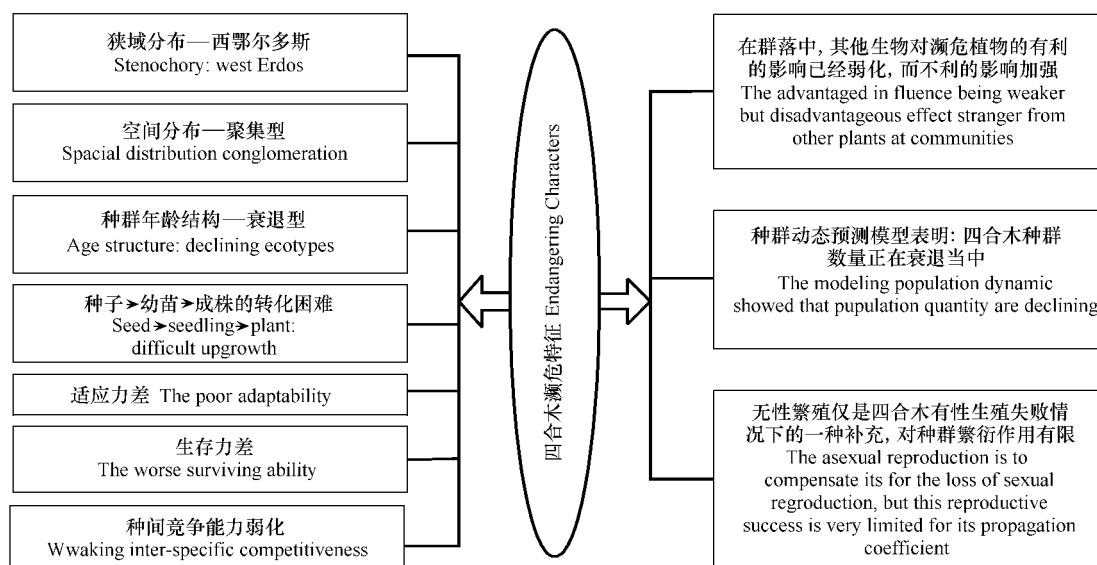


图2 四合木濒危特征

Fig. 2 The endangered characters of the endemic shrub *Tetraena mongolica*

四合木子遗种虽然个体寿命较长,其存活曲线为 Deevey ϵ 型。虽然生活史各个阶段死亡率差别不大,但其繁殖力很低,说明四合木种群空间分布格局的为聚集型,而且群落内的生境异质性显著。

1.3 四合木在生理生态学方面存在生存力、适应力较差的特性

大多数濒危植物的光合、呼吸和蒸腾等生理代谢速率比对照种在相同条件下要低^[4]。四合木营养生长与气候因子有着明显的相关关系,其中水分是制约四合木营养生长的主要因子,同时四合木营养生长受到降水、气温的综合影响^[19]。四合木的蒸腾和水势都较低,这是其长期适应干旱气候环境协同进化的结果。四合木的水分代谢较弱,从积极的方面看,低的耗水量可适应在干旱区生长;但另一方面也表现出生长十分缓慢,遭到破坏后,更新复壮困难。根据一般的观点,零膨压点的渗透势 $\psi_{\pi,p}$ 越低则表明植物叶片能在更严重的干旱胁迫下保持正的膨压,因为拥有较低的 $\psi_{\pi,p}$ 值对旱生植物而言十分重要。与沙生植物沙柳 (*Salix pammophila*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*)、中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*)、沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*)、沙地柏 (*Sabina vulgaris*)、蒙古岩黄芪 (*Hedysarum mongolicum*) 及籽蒿 (*Artemisia sphaerocephala*) 相比,四合木、霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon*) 的 $\psi_{\pi,p}$ 值为最低。同时较低的原初渗透势 ($\psi_{\pi,o}$) 值可以使细胞的伸长在水分胁迫下得以正常进行。而这几种沙旱生植物中四合木、霸王等具有较低的 $\psi_{\pi,o}$ 值^[21]。四合木、霸王的零膨压点的渗透水体积与原初渗透水体积之比 (V_p/V_o) 分别为 62.50%、54.96%,这与这两种植物的零膨压点的渗透势 ($\psi_{\pi,p}$) 非常低相一致,在这种情况下,耐干旱胁迫使其渡过极度缺水的季节。

由于濒危植物四合木种群的分布区狭小、缺乏基因交流,四合木生理生态学适应能力逐步弱化,出现了生理代谢与环境条件相互适应方面的分化。

1.4 四合木的种间竞争能力弱化

四合木进入成年期后,在群落中处于不利的竞争中地位,有让位于其它强旱生灌木白刺 (*Nitraria tangutorum*) 和霸王的趋势。野外观察显示,景观破碎化后形成的空斑逐步被白刺和四合木的近缘中霸王所占据。

1.5 在天然条件下,结实率低且种子向幼苗以及幼苗向成株的转化困难

四合木种子产量低、品质差,种子向幼苗的转化率低,形成的幼苗数量少。且种子向幼苗的转化困难,没有足够数量的幼苗,种群就难以维持^[22]。在自然群落中虽可见到四合木的实生苗,但实生苗的成活率低,极少见到幼龄个体^[17,23]。

1.6 四合木无性繁殖对种群繁衍的作用有限

无性繁殖是在有性生殖失败情况下繁衍后代的对策。四合木存在自交,异交两种交配方式相混合的繁育系统,这与其它濒危植物矮牡丹 (*Paeonia suffruticosa* subsp. *Spontanea*)^[24]、刺五加 (*Eleutherococcus brachypus*)^[25]、裂叶沙参 (*Adenophora lobophylla*)^[26]、长喙毛茛泽泻 (*Ranalisma rostratum*)^[27] 有共同之处。四合木自交结实率为 15%,异交结实率为 50%,无融合生殖现象。花后结果率为 49%,即有 51% 的花随着胚胎发育而败育;果实成熟时,结果率为 31%,而结籽率约为 2.1% 左右^[8,28]。四合木作为古地中海残遗物种,它原本是一种异花传粉的植物,但在进化过程中,由于环境条件的恶劣限制了传粉昆虫的活动,因而逐渐进化出自花传粉的特征,具有多种传粉途径来保证生殖成功^[28]。即使如此,四合木的平均结实率只有 10% 左右。四合木的传粉成功是依赖于在植株上巨大的花基数来实现的。四合木自交、异交相混合的繁育系统是四合木种群适应环境的表现。从生殖对策上看,四合木等子遗植物世代周期长,繁殖能力低,在生存上表现为 K 对策^[29]。

1.7 在群落中,其它生物对四合木有利的影响弱化,而不利的影响加强

由于环境恶化,生物多样性减少,原有的群落中生物间的互惠互利的稳定关系已经破坏,对四合木产生有利影响的传粉昆虫、鸟类和其它动物、微生物数量减少,而对其产生不利影响的动物和微生物活动增强。四合木种子由于鼠兔啃食,使其少量的饱满种子由于鼠害失去发芽的能力。只有埋于土壤较深层 (2cm 以下) 的种子才得以保留,存活种子数量极小,成为四合木更新的主要障碍。

1.8 四合木种群数量处于衰退中

在自然条件下,四合木内禀增长率为负值,而且种群年龄结构差异较大,大部分种群缺乏幼龄个体,有些种群严重衰退。Leslie 矩阵分析显示,在受外界干扰很小条件下,四合木种群具有波动特点,各龄级的个体数变化趋势不同,种群由衰退型向增长型过渡^[30]。由于实生苗的成活率低,幼龄个体补充不足,加之老龄个体死亡,种群动态在总体上呈衰退趋势^[23]。

2 四合木的濒危肇因与机制分析

理论上讲,物种濒危的原因主要有遗传衰竭、竞争产生特化、进化潜能的丧失、生境片段化导致分布区“岛屿化”以及生境异质性消失。对于物种遗传衰竭而言,消沉原理(the founder principle)认为,小种群遗传多样性差,遗传衰竭是因为隔离的小种群中基因的扩散改变了基因频率,使遗传多样性在小种群中减少的缘故。近交衰退学说认为,在小种群中极易发生种内近交,从而减少了种群之间的基因交换几率,因此限制了基因的流动,导致有害基因的显性而导致物种的遗传衰竭。而遗传多样性丧失使其遗传性趋于一致^[31~34]。

四合木生殖力、存活力和适应力低下等内在因素是其走向濒危的根本原因。在同样的外界生境条件下,广布种尚能正常生长发育,而濒危植物则不能,关键是其内在属性所致(图3)。

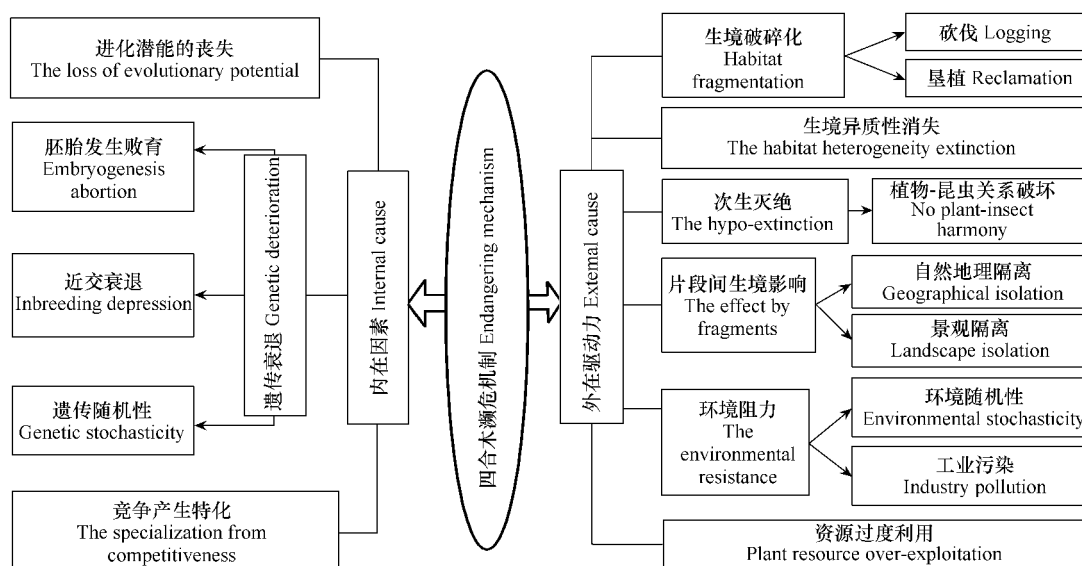


图3 四合木濒危机制

Fig. 3 The endangered mechanism of the endemic shrub *Tetraena Mongolica*

2.1 导致四合木濒危的内在因素分析

2.1.1 遗传多样性与遗传变异

四合木遗传多样性水平低于其近缘种霸王种群,种群间遗传分化不明显^[35,36]。四合木各斑块处于同一种群的半隔离状态(meta-种群)^[37,38]。Hamrick 认为,植物多态位点的遗传变异有 18% 来源于种群内,82% 存在于种群间。自交种有 51% 的遗传变异保存于种群之间,异交种只有 10%^[39]。四合木 5% 的遗传变异存在于种群斑块间,比 Hamrick 统计结果还要偏低,这说明四合木胚胎发生败育、近交衰退和遗传随机性等因素作用,丧失了部分进化潜能,只是在进化过程中,为环境所迫,进化出一定比例的自交以保障传粉的成功^[37]。

2.1.2 生活史中具有脆弱环节叠加现象

四合木种群在由种子向幼苗以及幼苗向成株方向转化阶段会出现死亡率高的现象。种子难以萌芽成苗,即使萌芽成苗,但存活困难成为种群衰退的关键阶段^[11]。四合木种群生活史多个脆弱环节综合与累加作用,导致四合木个体生长发育不良、早衰、短命,种群数量减少,经多世代重复导致四合木的生存能力降低^[30]。

2.1.3 地史变迁使其成为孑遗种

鄂尔多斯高原是中国北部大陆陆缘构造域中华北台地的一个陆核区,曾经历多次海陆变迁。该地区的地

质历史变化对四合木的分布、进化及适应性有很重要的影响^[40]。四合木作为古地中海孑遗植物,它的世代周期长,繁殖能力低^[28,41]。植物-传粉昆虫的互惠共生关系破坏,将造成四合木的次生灭绝(hypoextinction)^[22]。另一方面,生境破碎化使其逐步趋于小种群,导致自交和遗传漂变,致使逐步丧失进化潜能;同时由于竞争产生特化,使四合木长期生活在西鄂尔多斯地区的特殊环境中,适应了局部性生活环境与生长方式后,很难在获得其它生境条件下的竞争力,适应性差,种间竞争力下降,使种群走向衰退^[11]。这与银杉(*Cathaya argyrophylla*)^[42]、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)^[43]、攀枝花苏铁(*Cycas anzhihuaensis*)^[44]等濒危植物相似。

2.1.4 四合木对环境的依赖,在生境适宜性下降后,就难以更新

四合木生长于西鄂尔多斯特定的动态生境之中,其地理上的狭域分布与特定生境的极端化和地域选择(niche choice)有关。在西鄂尔多斯地区具备适合四合木生长的砾质漠钙土、150mm左右的降水和较大的地温昼夜温差。在离开四合木分布区较远的区域,由于四合木适应不了较好的水分条件和缺乏了较大的地表地温昼夜温差,因此,四合木生长和发育都会受到影响^[11,14]。

2.2 外在驱动力

在自然条件下,外界干扰等致危因素一般是植物走向濒危的推动力。同样,外界干扰过分强烈,成为植物濒危四合木的致命因素。首先,由于四合木植物油含量较高而易燃,曾一度成为这一地区居民的生活和炼焦的能源^[13]。与此同时,垦植(reclamation)和过度放牧,煤炭开采和工业污染等人为干扰导致生境条件的严重退化,对四合木走向濒危生态学过程起到了推动作用^[15,46~48]。

四合木种群生态适应性和生境适宜性下降以及外部环境因素和内部机理变化等因素的共同作用,导致了我国特有种四合木的濒危,加强保护生物学的深入研究刻不容缓。

3 四合木异地保护生物学研究取向

四合木的就地保护在西鄂尔多斯自然保护区内积极的进行着,证实了四合木就地保护的可能性。但由于其有性繁殖能力衰退,自然更新能力弱和生态适应性和生境适宜性的明显下降,对其进行异地保护(*ex situ conservation*)已由可能成为必然^[49]。

从西鄂尔多斯地区生境适宜性和种群生态适应性特征的角度,探讨从四合木原分布地——草原化荒漠干旱棕钙土生境向典型草原半干旱栗钙土生境进行异地保护的可能性。对四合木异地保护的生态地理条件、气候生物学特征、客土栽培和无土栽培四合木的生长量进行分析,同时从西鄂尔多斯地区地球化学循环和四合木生境适宜性特征角度,研究土壤和四合木植株的微量元素 Fe, Mn, B, Cu, Zn, Co, Se 和 Mo 含量特征^[50]以及次生代谢产物氨基酸含量特征^[6,51]。对四合木异地保护过程中的生态适应性与生境适宜性进行综合分析认为,特定的气候条件与土壤条件是保证四合木生存的环境,而首要的条件是气候条件。土壤微量元素含量不是四合木异地保护中成活与生长的限制因子。西鄂尔多斯地区地温昼夜温差的特殊性,可能是异地保护成功与否的限制因子之一。前人对四合木的异地保护曾做过多次试验,均无果而终,这可能与以前带土移植成株有关。根据 2001~2007 年对从四合木原分布地——草原化荒漠干旱棕钙土生境向典型草原半干旱栗钙土生境进行异地保护的 6 个生长季的保护生物学研究结果显示,进一步证实了带土移植成株四合木难以成功的现实,但异地栽培的四合木实生苗取得了成功。尽管异地栽培的四合木实生苗生长量较四合木原生环境条件下的生长量为小,但成活率可以达到 89%,而且长势较好,并顺利完成了开花过程,但完成异地保护四合木从种子(播种)到种子(开花、结果)生长发育的全过程,克服生殖过程中胚胎发生败育的瓶颈,仍需不断探索和深入研究。

鉴于上述分析认为,植物种群的拓展、生命的延续是靠生殖实现的^[52],四合木生殖过程中胚胎发育过程中的败育、种子萌发、幼苗转化困难是造成有性生殖受阻,生活史断裂,最终导致植物濒危的重要内因。而四合木分布区人为干扰、过度利用、城市化、工业化以及过度放牧等原因造成其种群缩小、孤立和生境破碎化,最终由于基因流受阻、遗传漂变造成遗传多样性丧失是物种致濒的外因。大多数物种的濒危都是由于内因和外

因等综合因素的干扰所致^[53~62]。因此, 从不同角度探讨孑遗物种的濒危肇因, 对于提出科学的保护措施至关重要。对于孑遗植物四合木而言, 对其生境对物种的适宜性和物种对生境的适应性两个方面进行综合研究, 进一步探索其生境适宜性下降的主要原因和物种致濒的生物学过程, 最终使孑遗濒危植物四合木异地保护由可行变为现实。

References:

- [1] Raup D M. Diversity crises in the geological past. Wilson E O, Peter F M. Biodiversity. Washington: National Academy Press, 1988. 51—57.
- [2] Myers N. Threatened biotas: hotspot in tropical forests. The Environmentalist, 1988 (8): 187—208.
- [3] Zu Y G, Wang W J, Yang F J, et al. Dynamic analysis and diversity of plant life cycle forms. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (11): 1811—1818.
- [4] Zhang W H, Zu Y G, Liu G B. Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (9): 1512—1520.
- [5] Liu Z L, Yong S P, Wang Y F. eds. Inner Mongolia vegetation. Beijing: Science Press, 1985. 332—367, 476—477, 684—686.
- [6] Liu Y R, Yang C. Comparative study on vitality of *Tetraena mongolica* seeds in different time and different places. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 2001, 32(3): 297—300.
- [7] Shun W G, Yong S P. The preliminary study analysis of majorelements, traceelement, amino acid and calorific value of *Tetraena mongolica* Maxim. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 1995, 26(4): 462—465.
- [8] Wang F, Yang C. A study on the natural renewal and on-site conservation of *Tetraena Mongolica* Maxim. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 2003, 34(2): 196—202.
- [9] Wang Y C, Hou Y W, Zhang Y J, et al. Reproductive Strategies of *Tetraena Mongolica* Maxim. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(6): 699—703.
- [10] Zhang Y J, Yang C. Population genetic diversity and differentiation of endemic species *Tetraena mongolica* on the western Ordos. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 506—511.
- [11] Zhang Y J, Yang C. Comparative analysis of genetic diversity in the endangered shrub *Tetraena mongolica* and its related congener *Zygophyllum xanthoxylon*. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(4): 425—429.
- [12] 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.
- [13] Leak W B. Age distribution in virgin red spruce and northern hardwoods. Ecology, 1975, 56(6): 1451—1454.
- [14] Zhi Y B, An S Q, Yang C, et al. Advances in research on the endangered endemic shrub *Tetraena Mongolica*. In: Advances in ecological science (Vol. 2). Beijing: Higher Education Press, 2005. 95—103.
- [15] Zhang Y F, Yang C, Chen J K. Spatial-temporal change of landscape structure in the distribution region of *Tetraena mongolica*. Journal of Wuhan Botany Research, 2001, 19(1): 25—30.
- [16] Zhu Z Y, Ma Y Q, Liu Z L. Endemic plants and floristic characteristics in Alashan-Ordos biodiversity center. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1999, 13(2): 1—16.
- [17] Zhang H R, Yang C, Ye B. Study on the population structure and dynamic of endangered shrub *Tetraena mongolica*. In: Li B. The study on biodiversity conservation of grassland, Huhhot: Inner Mongolia University Press, 1995. 89—103.
- [18] Su Z X, Zhong Z C, Yang W Q. Study on the reproductive ecology of *Cordia acuminata* population I. Study on the reproductive age structure and their affecting factors. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(5): 517—524.
- [19] Yang L, Yang C, Yang C M. The study on relationship between growth and precipitation and temperature. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 1996, 27(6): 816—820.
- [20] Liu G H, Zhou S Q, Zhang L. The preliminary study on water- metabolizing of *Tetraena mongolica*. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1993, 7(2): 100—105.
- [21] Dong X J. Experimental measurement of the water relations parameters of nine shrubs and some ecological interpretations. Acta Botanica Sinica, 1998, 40(7): 675—664.
- [22] Zhang Y J, A L M S, Yang C. The analysis of capability of generative reproduction on *Tetraena mongolica*. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 1997, 28(2): 268—270.
- [23] 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—81.

- [24] Zhang F. The endangered causes of *Paonia suffruticosa* var. *spontanea*, an endemic to China, *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (7):1436—1441.
- [25] Liu L D, Zhu N, Shen J H, *et al.* Comparative studies on floral dynamics and breeding system between *Eleutherococcus senticosus* and *E. sessiliflorus*, *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (7):1041—1048.
- [26] Zhu Y G, Zhang W H, Yan X F, *et al.* Conservation Biology of endangered Plant *Adenophora lobophylla*. Beijing: Science Press, 1999. 136—148.
- [27] Chen Z Y, He G Q, Chen J K. Observation on biological characters of *Ranalisma rostratum*. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 1997, 43 (2):201—204.
- [28] Wu S B, Tu L Z. The classify of embryo develop on *Tetraena mongolica*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1990. 21 (1):23—29.
- [29] Xu Q, Liu S R, Zang R G. The characteristics of reproductive ecology of endemic species *Tetraena mongolica* population in China-Reproductive value and reproductive allocation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37 (2):36—41.
- [30] Xu Q, Zang R G, Liu S R. A study on the population structure and dynamics of *Tetraena mongolica* endemic to China. *Forest Research*, 2000, 13 (5):485—492.
- [31] Manuel C. Molles Jr. Ecology: concepts and application (2nd edition). Singapor: The McGraw-Hill Book Co., 2002.
- [32] Holsinger K E. Conservation programs for endangered plant species. In: Nierenberg W A ed. *Encyclopedia of Environmental biology*. Vol. 1. San Diego, CA: Academic Press, 1995. 385—400.
- [33] Conant S. Saving endangered species by translocation. *BioScience*, 1998, 38:254—257.
- [34] Menges E S. Population viability analyses in plants: challenges and opportunities. *Tree*, 2000, 15 (2):51—56.
- [35] Zhang Y j, Yang C. Population genetic diversity and differentiation of endemic species *Tetraena mongolica* on the western Ordos, *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (3):506—511.
- [36] Zhang Y J, Lu P. Analysis of the genetic structure of the endangered shrub *Tetraena mongolica*. *Jouranal of Ineer Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 35 (1):89—93, 98.
- [37] Zhang Y j, Yang C. An analysis of the genetic diversity of populations endemic species *Tetraena mongolica* Maxim. (*Zygophyllaceae*) by RAPD in Ordos Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (11):917—922.
- [38] Ge X J, Yu Y, Zhao N X, *et al.* Genetic variation in the endangered Inner Mongolia endemic shrub *Tetraena mongolica* Maxim. (*Zygophyllaceae*), *Biological Conservation*, 2003, 111:427—434.
- [39] Hamrick J L. Isozymes and the analysis of genetic structure in plant populations. In: Soltis D E, Soltis P M eds. *Isozymes in Plant Biology*. London: Chapman and Hall, 1990. 87—105.
- [40] Shi P J. The theory and practice on the palaeo-environment evolvement-The post Pleistocene later period ancient geographical conditions in Erdos plateau. Beijing: Science Press, 2002. 52—56, 118—123.
- [41] Wang Y C, Zheng R, Yang C. The cytological studies on male-sterility of *Tetraena mongolica* Maxim. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol*, 2000, 31 (1):88—92.
- [42] Xie Z Q, Chen W L. The endangering causes and preserving strategies for *Cathaya argyrophylla*, a plant endemic to China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1999, 23 (1):1—7.
- [43] He S A, Hao R M. Study on the natural population dynamics and the endangering habitat of *Liriodendron chinense* in China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1999, 23 (1):87—95.
- [44] He Y H, Li C L. The ecological geographic distribution, spatial pattern and collecting history of *Cycasp anzhihuaensis* population. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1999, 23 (1):23—30.
- [45] Zhao Q X. Studies on the Wuhai Municipal land use status of Inner Mongolia. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology (Supplement)*, 2003, 2:199—200.
- [46] 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 (3):436—443.
- [47] Zhi Y B, Wang Z L, Ma Z, *et al.* The speciation and bioavailability of heavy metals pollutants in soil along highway in Erdos. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5):2030—2039.
- [48] Zhi Y B, Wang Z L, Wang Z S, *et al.* The absorption and accumulation of heavy metals pollutants in plant along highway in western Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5):1863—1872.
- [49] Heywood V H. Global biodiversity assessment. Cambridge: The Cambridge University Press, 1995. 1131—1140.
- [50] Zhi Y B, Yang C, Yao Y P, *et al.* Characteristics analysis of micro-element contents in western Erdos soil and in *Tetraena mongolica* plant. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2004, 15 (3):396—400.

- [51] Zhi Y B, Yang C, Wang Z L, *et al.* Characteristic analysis of amino acid contents of *Tetraena mongolica* Maxim. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol*, 2005, 36(3): 306—312.
- [52] Frankham R, Briscoe D A. *Introduction to conservation genetics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 126—142.
- [53] Tian G W, Liu L D, Wang Z L, *et al.* Studies on the structure, afterripening and cytochemistry of seed in *Eleutherococcus senticosus*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(1): 7—13.
- [54] Zhang Y T, Chen Z X Z, Qi W Q, *et al.* A study on the micro-sporogenesis and the development of the male gametophyte in *Cimicifuga Nanchuanensis*, an endangered plant. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1997, 33(6): 788—793.
- [55] Wiens D, Nickrent D J, Davern C I, *et al.* Development failure and loss of reproductive capacity in the rare Palaeoendemic shrub *Dedeckera eurekensis*. *Nature*, 1989, 338: 65—67.
- [56] Qi W Q, You R L, Chen X L. Pollination biology in *Cimicifuga nanchuanensis* an endangered species (Ranunculaceae). *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(8): 688—694.
- [57] Schulze E D, Mooney H A. *Biodiversity and ecosystem function*. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 27—63.
- [58] Chen L Z, Ma K P. *Biodiversity science: Theory and application*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2001, 249—290.
- [59] Stebbins G L. A brief summary of my ideas on evolution. *American Journal of Botany*, 1999, 86(8): 1207—1208.
- [60] International Union for the Conservation of Nature and Resources. *IUCN Red List Categories*. Gland: Switzerland, IUCN, 1994.
- [61] Fahrig L. How much habitats is enough. *Biological Conservation*, 2001, 100(1): 65—74.
- [62] Ludwig D. Is it meaningful to estimate probability of extinction? *Ecology*, 1999, 80: 298—310.

参考文献:

- [3] 祖元刚, 王文杰, 杨逢建, 等. 植物生活史型的多样性及动态分析. *生态学报*, 2002, 22(11): 1811—1818.
- [4] 张文辉, 祖元刚, 刘国彬. 十种濒危植物的种群生态学特征及致危因素分析. *生态学报*, 2002, 22(9): 1512—1520.
- [5] 刘钟龄, 雍世鹏, 王义风, 等. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985. 332—367, 476—477, 684—686.
- [6] 刘颖茹, 杨持. 濒危物种四合木种子活力时空变异的比较研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2001, 32(3): 297—300.
- [7] 孙卫国, 雍世鹏. 四合木常量元素、微量元素、氨基酸和热值的初步分析. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1995, 26(4): 462—465.
- [8] 王峰, 杨持. 四合木的自然更新和就地保护的研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2003, 34(2): 196—202.
- [9] 王迎春, 侯艳伟, 张颖娟, 等. 四合木种群生殖对策的研究. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 699—703.
- [10] 张颖娟, 杨持. 西鄂尔多斯特有种四合木种群遗传多样性和遗传分化研究. *生态学报*, 2001, 21(3): 506—511.
- [11] 张颖娟, 杨持. 濒危物种四合木与近缘种霸王遗传多样性的比较研究. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 425—429.
- [12] 杨持, 智颖颀, 征荣. 四合木种群的生态适应性. *生态学报*, 2006, 26(1): 91—96.
- [13] 杨持, 王迎春, 刘强等. 四合木保护生物学. 北京: 科学出版社, 2002, 476—477, 684—686.
- [14] 智颖颀, 安树青, 杨持, 等. 四合木(*Tetraena mongolica*) 研究进展. *生态学进展(第二卷)*. 北京: 高等教育出版社, 2005. 95—103.
- [15] 张云飞, 杨持, 陈家宽. 四合木分布区景观结构时空变化分析. *武汉植物研究*, 2001, 19(1): 25—30.
- [16] 朱宗元, 马毓泉, 刘钟龄, 等. 阿拉善-鄂尔多斯生物多样性中心的特有植物和植物区系的性质. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(2): 1—16.
- [17] 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.
- [18] 苏智先, 钟章成, 杨万勤, 等. 四川大头茶种群生殖生态学研究 I. 生殖年龄、生殖年龄结构及其影响因素研究. *生态学报*, 1996, 16(5): 517—524.
- [19] 杨理, 杨持, 杨春明. 四合木营养生长和降水、气温的关系. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1996, 27(6): 816—820.
- [20] 刘果厚, 周世权, 张力, 等. 四合木水分代谢特征的初步研究. *干旱区资源与环境*, 1993, 7(2): 100—105.
- [21] 董学军. 九种沙生灌木水分关系参数的试验测定及生态意义. *植物学报*, 1998, 40(7): 675—664.
- [22] 张颖娟, 阿里穆斯, 杨持. 四合木有性繁殖能力的观测. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1997, 28(2): 268—270.
- [23] 迟彬, 安红霞, 郝敦元. 阿拉善荒漠区东部的残遗植物——四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.) 种群动态的分析——运用 Leslie 矩阵的讨论. *干旱区资源与环境*, 2000, 14(2): 77—81.
- [24] 张峰. 濒危植物矮牡丹致濒原因分析. *生态学报*, 2003, 23(7): 1436—1441.
- [25] 刘林德, 祝宁, 申家恒, 等. 刺五加、短梗五加的开花动态及繁育系统的比较研究. *生态学报*, 2002, 22(7): 1041—1048.
- [26] 祖元刚, 张文辉, 阎秀峰, 等. 濒危植物裂叶沙参保护生物学. 北京: 科学出版社, 1999, 136—148.
- [27] 陈中义, 何国庆, 陈家宽. 濒危植物长喙毛茛泽泻生物学特性观察. *武汉大学学报(自然科学版)*, 1997, 43(2): 201—204.
- [28] 吴树彪, 屠骊珠. 四合木胚胎发育及系统地位. *西北植物学报*, 1990, 21(1): 23—29.
- [29] 徐庆, 刘世荣, 臧润国, 等. 中国特有植物四合木种群的生殖生态特征——种群生殖及生殖分配研究. *林业科学*, 2001, 37(2): 36—41.

- [30] 徐庆,臧润国,刘世荣,等. 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 (5): 485 ~ 492.
- [35] 张颖娟,杨持. 西鄂尔多斯特有种四合木种群遗传多样性及遗传分化研究. 生态学报, 2001, 21(3): 506 ~ 511.
- [36] 张颖娟,卢萍. 特有种四合木种群遗传结构分析. 内蒙古师范大学学报(自然科学版), 2006, 35(1): 89 ~ 93, 98.
- [37] 张颖娟, 杨持. 中国特有种四合木种群遗传多样性的 RAPD 分析. 生态学报, 2002, 22 (11): 1917 ~ 1922.
- [40] 史培军. 地理环境演变研究的理论与实践——鄂尔多斯高原晚第四纪以来地理环境演变的研究. 北京: 科学出版社, 1999. 52 ~ 56, 118 ~ 123.
- [41] 王迎春,征荣,杨持. 四合木(*Tetraena mongolica* Maxim) 雄性不育的细胞学研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2000, 31(1): 88 ~ 92.
- [42] 谢宗强,陈伟烈. 中国特有植物银杉的濒危原因及保护对策. 植物生态学报, 1999, 23(1): 1 ~ 7.
- [43] 贺善安,郝日明. 中国鹅掌楸自然种群动态及其致危生境的研究. 植物生态学报, 1999, 23(1): 87 ~ 95.
- [44] 何永华,李朝奎. 攀枝花苏铁种群生态地理分布、分布格局及采挖历史的研究. 植物生态学报, 1999, 23(1): 23 ~ 30.
- [45] 赵巧香. 对乌海市耕地现状及土地复垦的几点思考. 内蒙古农业科技(增刊), 2003, 2: 199 ~ 200.
- [46] 张云飞,杨持,李博,陈家宽. 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 (3): 436 ~ 443.
- [47] 智颖飙,王再岚,马中,等. 鄂尔多斯公路沿线土壤重金属形态与生物有效性. 生态学报, 2007, 27(5): 2030 ~ 2039.
- [48] 智颖飙,王再岚,王中生,等. 公路绿化植物油松和小叶杨对重金属元素的吸收和积累. 生态学报, 2007, 27(5): 1863 ~ 1872.
- [50] 智颖飙,杨持,姚一萍,等. 西鄂尔多斯地区土壤与四合木微量元素含量特征分析. 应用生态学报, 2004, 15(3): 396 ~ 400.
- [51] 智颖飙,杨持,王再岚,等. 四合木(*Tetraena mongolica*) 氨基酸含量特征分析. 内蒙古大学学报, 2005, 36(3): 306 ~ 312.
- [53] 田国伟,刘林德,王仲礼,等. 刺五加种子结构、后熟作用及其细胞化学研究. 西北植物研究, 1999, 19(1): 7 ~ 13.
- [54] 张英涛,陈朱希昭,奇文清,等. 濒危植物南川升麻的小孢子发生和雄配子体发育. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(6): 788 ~ 793.
- [56] 奇文清,尤瑞麟,陈晓麟. 濒危植物南川升麻传粉生物学研究. 植物学报, 1998, 40 (8): 688 ~ 694.
- [58] 陈灵芝,马克平. 生物多样性科学: 原理与实践. 上海: 上海科学技术出版社, 2001. 249 ~ 290.