

# 17 种锦鸡儿属植物叶片解剖结构及抗旱性分析

马红英<sup>1</sup>, 吕小旭<sup>2</sup>, 计雅男<sup>1</sup>, 李小伟<sup>1</sup>

(1.宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2.甘肃医学院, 甘肃 平凉 744000)

**摘 要:**锦鸡儿是西北干旱、半干旱区防风固沙和水土保持的重要植物资源,对生态环境恢复有着重要意义。以 17 种锦鸡儿属植物叶片作为试验材料,使用石蜡切片法观察叶片解剖结构,测定了叶片厚度、上、下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、主脉厚度、叶片结构紧密度、叶片结构疏松度 8 项叶片结构指标,利用层次聚类 and 隶属函数分析了 17 种锦鸡儿属植物的抗旱能力。结果表明:叶肉解剖结构有 3 种不同类型,在抗旱性增强的过程中,叶肉结构从普通型、过渡型、环栅型依次过渡,叶片表现为逐渐变厚,栅栏组织、主脉越来越发达,叶片结构紧密度增大;层次聚类分析聚为 2 类,第 1 类主要特征是叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶片结构紧密度大,叶片结构疏松度小,叶肉结构为环栅型(边塞锦鸡儿过渡型);第 2 类主要特征是叶片结构疏松度大,叶片厚度、栅栏组织厚度、叶片结构紧密度、表皮细胞厚度小。根据隶属函数值 17 种锦鸡儿属植物的抗旱性由大到小排列的顺序为短脚锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>多刺锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>川西锦鸡儿>粉刺锦鸡儿>边塞锦鸡儿>南口锦鸡儿>红花锦鸡儿>甘蒙锦鸡儿>鬼箭锦鸡儿>柠条锦鸡儿>黄刺条锦鸡儿>刺叶锦鸡儿>灰毛小叶锦鸡儿>中间锦鸡儿>树锦鸡儿。研究结果能为锦鸡儿属植物在干旱半干旱地区植被恢复与重建中的推广应用提供理论依据。

**关键词:**锦鸡儿; 叶片; 解剖结构; 抗旱性

**中图分类号:**Q944.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)01-0340-07

## Leaf Anatomical Structure and Drought Resistance of 17 *Caragana* Species

MA Hongying<sup>1</sup>, LÜ Xiaoxu<sup>2</sup>, JI Yanan<sup>1</sup>, LI Xiaowei<sup>1</sup>

(1.College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2.Gansu Medical College, Pingliang, Gansu 744000, China)

**Abstract:** *Caragana* is an important plant resource for windbreak and sand-fixation, and soil and water conservation in the arid and semi-arid regions of northwest China, which is the great significance to restoration of ecological environment. In this study, the leaves of 17 *Caragana* species were used as experimental materials. The anatomical structure of leaves was observed by paraffin section technique. Eight leaf structure indexes such as leaf thickness, upper and lower epidermal cell thickness, palisade tissue thickness, spongy tissue thickness, main vein thickness, leaf structural tightness, leaf structural looseness were measured. The drought-resistant ability of 17 *Caragana* species was analyzed by hierarchical cluster analysis and subordinate function values. The results showed that there were three different types of mesophyll anatomical structure, during the process of drought-resistance enhancement, the mesophyll structure transited from ordinary type to transitional type and annular type; the leaf became thicker and thicker gradually; the palisade tissue and main vein became more and more developed, and the leaf structure became more compact; two groups were divided by hierarchical cluster analysis, the first group was characterized by large leaf thickness, palisade tissue thickness, sponge tissue thickness, leaf structure compactness, small leaf structure looseness and ring palisade structure (transitional type of *C. bongardiana*), the second group was characterized by large leaf structure looseness, leaf thickness and palisade tissue thickness, tight leaf structure and small epidermal cells thickness. According to the subordinate function values, drought-resistance ability of 17 *Caragana*

收稿日期:2019-02-25

修回日期:2019-03-21

资助项目:国家自然科学基金(31560154);宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01);农业部草地资源检测项目(2016)

第一作者:马红英(1993—),女(回族),宁夏固原隆德县人,硕士研究生,主要从事草地生态学研究。E-mail: mahoyi@126.com

通信作者:李小伟(1978—),男,甘肃平凉人,教授,博士,主要从事植物分类与生态学研究。E-mail: Lxwbq@126.com

species decreased in the order: *C. brachypoda* > *C. roborovskyi* > *C. spinosa* > *C. acanthophylla* > *C. erinacea* > *C. pruinosa* > *C. bongardiana* > *C. zahlbruckneri* > *C. rosea* > *C. opulens* > *C. jubata* > *C. korshinskii* > *C. frutex* > *C. acanthophylla* > *C. microphylla* > *C. intermedia* > *C. sibirica*. The results of this study can provide the theoretical basis for the popularization and application of *Caragana* in vegetation restoration and reconstruction in the arid and semi-arid areas.

**Keywords:** *Caragana*; leaf; anatomical structure; drought resistance

锦鸡儿属(*Caragana* Fabr.)是豆科蝶形花亚科灌木或小乔木。全世界约有 100 种,主要分布于亚洲和欧洲东部温带干旱和半干旱地区,约有 66 种分布于我国东北、华北、西北、西南各省区,是温带荒漠、半荒漠地区及亚热带高寒地区的主要建群种<sup>[1]</sup>,因此我国锦鸡儿属植物资源丰富。该属中许多植物在我国被用于防风固沙、水土保持、牲畜饲料以及生产燃料和纤维的生物资源,其中 10 余种被用在传统中药、蒙药和藏药中已有悠久的历史,被认为具有“滋阴,健脾,活血和促血”的功效<sup>[2]</sup>;锦鸡儿属植物根系发达,具根瘤,抗旱耐瘠,是水土保持和防风固沙的优良树种<sup>[3]</sup>;在黄土高原地区进行了大面积的推广应用,已证实退化严重的半干旱和干旱地区,该属植物对植被恢复具有重要的意义<sup>[4]</sup>。鉴于此,近年来,锦鸡儿属植物备受学者关注,国内外学者主要对锦鸡儿属植物的系统分类与区系<sup>[5]</sup>、形态解剖<sup>[6-7]</sup>、遗传与育种<sup>[8-9]</sup>和细胞与分子生物学<sup>[10]</sup>等方面进行了报道。

干旱是影响植物正常生长的主要因素之一<sup>[11-12]</sup>,植物对干旱环境的适应是形态结构、生理和生化等多方面综合作用的结果,且形态结构是植物生理生化反应的基础。而植物叶片直接暴露在外界环境中,对外界环境反应最为敏感,其结构特征能够反映植物对水分的利用状况,因此植物叶片、上下表皮、栅栏组织、海绵组织和主脉厚度能够反映植物的抗旱特征。有研究表明:叶片厚度、栅栏组织厚度、主脉厚度和紧密度等与抗旱性呈正相关关系;海绵组织厚度、疏松度等与抗旱性呈负相关关系<sup>[13-14]</sup>。

本研究选取民勤沙生植物园和贺兰山南寺 17 种锦鸡儿属植物叶片为试验材料,借助石蜡切片技术观察叶片解剖结构,综合评价其抗旱特性,其研究结果对干旱、半干旱地区植被恢复树种选择具有指导意义,同时为锦鸡儿属植物资源的合理开发利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料区概况

本研究所用材料取自甘肃民勤沙生植物园和内蒙古贺兰山南寺。民勤沙生植物园位于民勤县腾格

里沙漠西缘,气候属温带大陆性极干旱气候,具有明显的沙漠气候特征,风大沙多,降雨稀少,气候干燥,日照强烈,年平均气温 7.4℃,年平均降水量 110 mm,年蒸发量 2 500~2 700 mm,无霜期 180 d 左右;贺兰山南寺位于巴彦浩特东南 30 km 处,气候属中温带干旱地区,该地区干旱少雨,风大沙多,日照强烈,蒸发量大,年平均降雨量 200 mm,年蒸发量 1 500~3 000 mm,无霜期 145 d 左右。

### 1.2 研究材料

采集的材料包括南口锦鸡儿(*C. zahlbruckneri*)、狭叶锦鸡儿(*C. stenophylla*)、甘蒙锦鸡儿(*C. opulens*)、短脚锦鸡儿(*C. brachypoda*)、荒漠锦鸡儿(*C. roborovskyi*)、边塞锦鸡儿(*C. bongardiana*)、树锦鸡儿(*C. sibirica*)、红花锦鸡儿(*C. rosea*)、黄刺条锦鸡儿(*C. frutex*)、多刺锦鸡儿(*C. spinosa*)、刺叶锦鸡儿(*C. acanthophylla*)、灰毛小叶锦鸡儿(*C. microphylla*)、柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)、粉刺锦鸡儿(*C. pruinosa*)、中间锦鸡儿(*C. intermedia*)、鬼箭锦鸡儿(*C. jubata*)和川西锦鸡儿(*C. erinacea*)共 17 种(表 1)。每种植物选取发育良好、有代表性的植株,选取其叶,每种锦鸡儿采 6 株,共 6 次重复。于 2018 年 6 月采样,经 FAA 固定,采用石蜡切片法切片(取材、固定、脱水、透明、透蜡、包埋、切片、贴片、染色、封藏等步骤)制成永久制片,将制片置于 Olympus 显微镜下观察、并用 Motic Image Advanced 3.0 软件测量并进行显微照相,2018 年 10 月完成测定。

### 1.3 数据处理

选择叶片厚度、上表皮细胞厚度、下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、主脉厚度、叶片结构紧密度和叶片结构疏松度共 8 项叶片抗旱性结构指标进行测定。栅/海=栅栏组织厚度/海绵组织厚度,组织结构紧密度=栅栏组织厚度/叶片厚度,组织结构疏松度=海绵组织厚度/叶片厚度。Microsoft Excel 2010 软件整理试验数据,并使用 SPSS 21.0 软件对叶片样本进行层次聚类分析。

### 1.4 抗旱能力综合评价

通过模糊数学隶属函数值法综合评价 17 种锦鸡

儿属植物的抗旱性<sup>[15]</sup>。

$$R(X_i)=(X_i-X_{i\min})/(X_{i\max}-X_{i\min})$$
$$(i=1,2,3,\cdots,n)$$

(1)

式中: $X_i$  为指标测定值; $X_{i\max}$  和  $X_{i\min}$  分别为所有材料中同一指标的最大值和最小值。若测定指标与抗旱性为负相关关系,则计算方法为:

$$R(X_i)=1-(X_i-X_{i\min})/(X_{i\max}-X_{i\min})$$
$$(i=1,2,3,\cdots,n)$$

(2)

将抗旱隶属函数值进行累加,求其平均数:

$$X=\sum R(X_i)/n$$

$(i=1,2,3,\cdots,n)$

式中: $X$  为平均抗旱隶属值。 $X$  大表示抗旱性强; $X$  小表示抗旱性弱。

表 1 材料名称及来源

种名	生活型	分布地	采集时间	采集地点
南口锦鸡儿	灌木	河北北部、山西西北部	2018-6	民勤沙生植物园
狭叶锦鸡儿	矮灌木	内蒙古、河北西北部、山西北部、陕西东北部、宁夏、甘肃北部、青海	2018-6	贺兰山南寺
甘蒙锦鸡儿	矮灌木	内蒙古、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海东部、四川北部、西藏	2018-6	贺兰山南寺
短脚锦鸡儿	矮灌木	内蒙古、宁夏北部、甘肃	2018-6	贺兰山南寺
荒漠锦鸡儿	矮灌木	内蒙古、宁夏西北部、甘肃、青海东部、新疆	2018-6	民勤沙生植物园
边塞锦鸡儿	灌木	新疆	2018-6	民勤沙生植物园
树锦鸡儿	小乔木或大灌木	黑龙江东部、辽宁西北部、内蒙古、河北、山西、陕西、甘肃东部、新疆北部	2018-6	民勤沙生植物园
红花锦鸡儿	灌木	辽宁、内蒙古、河北、山东、山西、河南、陕西、甘肃南部、河南北部	2018-6	民勤沙生植物园
黄刺条锦鸡儿	灌木	新疆	2018-6	民勤沙生植物园
多刺锦鸡儿	矮灌木	新疆北部	2018-6	民勤沙生植物园
刺叶锦鸡儿	灌木	新疆北部	2018-6	民勤沙生植物园
灰毛小叶锦鸡儿	灌木	东北、华北及山东、甘肃东部	2018-6	民勤沙生植物园
柠条锦鸡儿	小乔木或大灌木	内蒙古西部、宁夏北部、甘肃北部	2018-6	民勤沙生植物园
粉刺锦鸡儿	灌木	新疆、内蒙古	2018-6	民勤沙生植物园
中间锦鸡儿	矮灌木	内蒙古、陕西北部、宁夏	2018-6	民勤沙生植物园
鬼箭锦鸡儿	灌木	内蒙古西部、宁夏北部和南部、河北、山西、陕西南部、甘肃南部、青海东南部、新疆、西藏东部	2018-6	贺兰山南寺
川西锦鸡儿	矮灌木	甘肃南部、青海东南部、四川西部、西藏东南部、云南西北部、宁夏南部	2018-6	民勤沙生植物园

2 结果与分析

2.1 17 种锦鸡儿属植物叶片解剖结构特征

通过对 17 种锦鸡儿属植物叶片横切面结构(图 1)观察,叶表皮细胞均为单层;但叶肉结构组成有显著差异,其解剖结构特点是:叶肉组织类型出现普通型、过渡型和环栅型,其中普通型栅栏组织和海绵组织并存,过渡型栅栏组织趋于发达,海绵组织逐渐退化,环栅型海绵组织基本消失。因此可分为以下 3 种类型:(1) 普通型,即叶肉组织在近轴面分化为栅栏组织,在远轴面分化为海绵组织,分别为南口锦鸡儿、甘蒙锦鸡儿、树锦鸡儿、红花锦鸡儿、黄刺条锦鸡儿、粉刺锦鸡儿和中间锦鸡儿;(2) 环栅型,即叶肉组织在近轴面和远轴面都分化为栅栏组织,这种类型是狭叶锦鸡儿、短脚锦鸡儿、荒漠锦鸡儿、多刺锦鸡儿和灰毛小叶锦鸡儿;(3) 过渡型,其海绵组织细胞形状趋于栅栏细胞状,且有些部位呈栅栏状,分别是边塞锦鸡儿、刺叶锦鸡儿、柠条锦鸡儿、鬼箭锦鸡儿和川西锦鸡儿。

与抗旱有关的叶肉结构特征数据(表 3)显示,多刺锦鸡儿叶片厚度最大,为 302.91  $\mu\text{m}$ ,树锦鸡儿的叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和主脉厚度最小,分别为 101.44  $\mu\text{m}$ ,31.18  $\mu\text{m}$ ,23.82  $\mu\text{m}$ ,53.96  $\mu\text{m}$ 。短脚锦鸡儿上表皮细胞厚度最大,为 21.02  $\mu\text{m}$ 。川西锦鸡儿上表皮细胞厚度和下表皮细胞厚度最小,但组织结构紧密度最大,分别为 10.34  $\mu\text{m}$ ,8.632  $\mu\text{m}$  和 0.50。狭叶锦鸡儿下表皮细胞厚度和主脉厚度最大,但组织结构紧密度最小,分别为 19.06  $\mu\text{m}$ ,125.16  $\mu\text{m}$  和 0.27。边塞锦鸡儿栅栏厚度和海绵厚度最大,分别为 126.46  $\mu\text{m}$  和 67.88  $\mu\text{m}$ 。中间锦鸡儿组织结构疏松度最大,为 0.31;粉刺锦鸡儿组织结构疏松度最小,为 0.18。

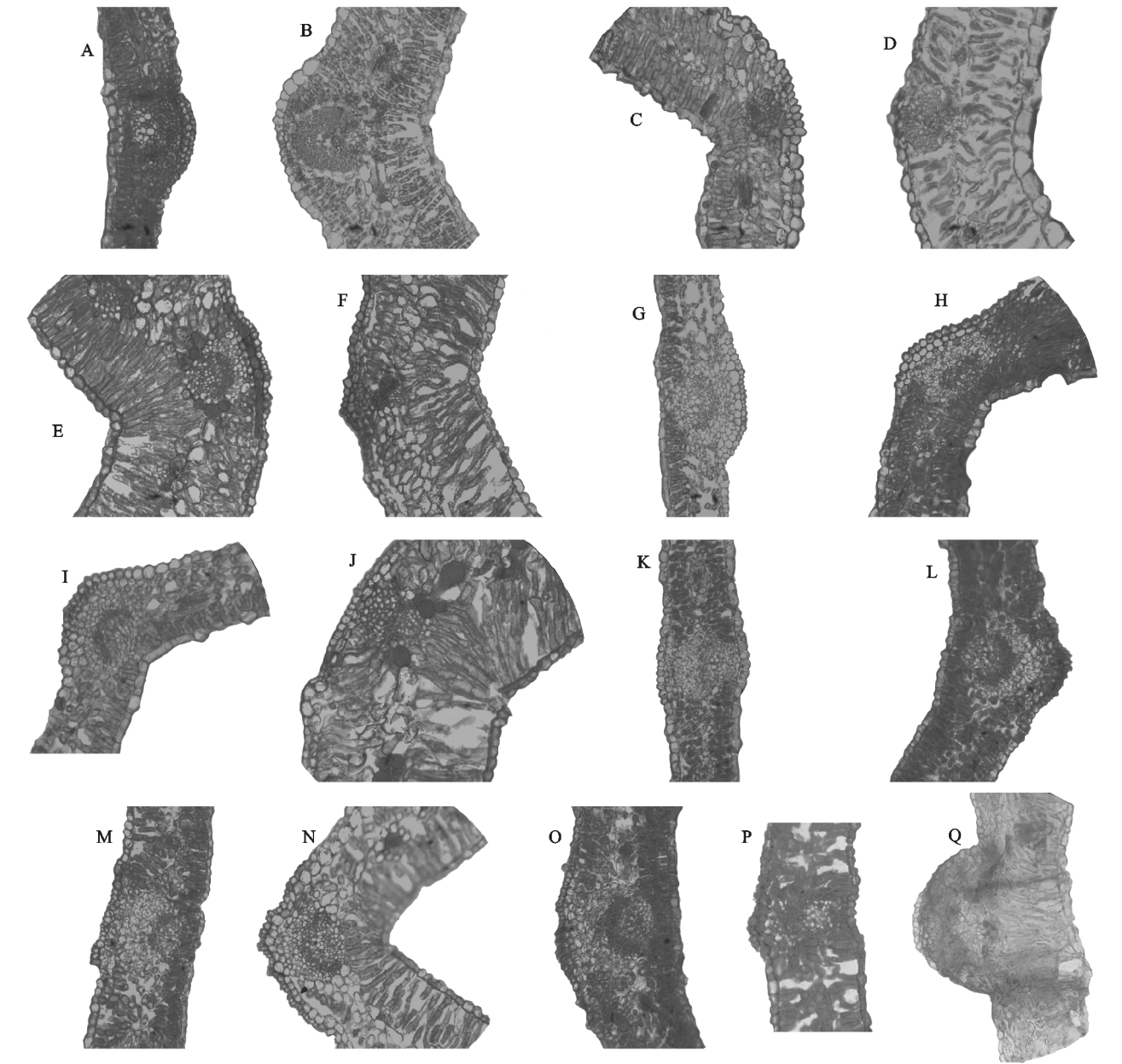
2.2 解剖结构的聚类分析

聚类分析结果表明(图 2):17 种锦鸡儿属植物分为 2 类;第 1 类包括荒漠、短脚、边塞和多刺锦鸡儿 4 种,叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶片结构紧密度大,表皮细胞层厚度较第 2 类偏小(除短脚锦鸡儿),叶片结构疏松度小;第 2 类包括灰毛小叶、



鬼箭、中间、红花、黄刺条、甘蒙、川西、柠条、粉刺、南口、刺叶、树和狭叶锦鸡儿 13 种,叶片结构疏松度大,

叶片厚度、栅栏组织厚度、叶片结构紧密度小,表皮细胞厚度小。



注: A 南口锦鸡儿, B 狭叶锦鸡儿, C 甘蒙锦鸡儿, D 短脚锦鸡儿, E 荒漠锦鸡儿, F 边塞锦鸡儿, G 树锦鸡儿, H 红花锦鸡儿, I 黄刺条锦鸡儿, J 多刺锦鸡儿, K 刺叶锦鸡儿, L 灰毛小叶锦鸡儿, M 柠条锦鸡儿, N 粉刺锦鸡儿, O 中间锦鸡儿, P 鬼箭锦鸡儿, Q 川西锦鸡儿。

图 1 17 种锦鸡儿叶片横切面解剖结构

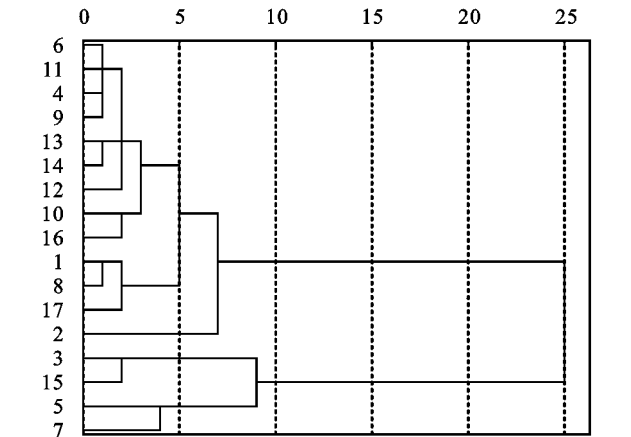
2.3 基于隶属函数对锦鸡儿属植物抗旱性分析

不同锦鸡儿属植物具有不同的抗旱性,本研究选取了 8 项叶片抗旱性结构指标,利用隶属函数来评价锦鸡儿属植物的抗旱能力,其数值越大表明抗旱性越强。结果显示,17 种锦鸡儿属植物抗旱能力由大到小排序为:短脚锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>多刺锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>川西锦鸡儿>粉刺锦鸡儿>边塞锦鸡儿>南口锦鸡儿>红花锦鸡儿>甘蒙锦鸡儿>鬼箭锦鸡儿>柠条锦鸡儿>黄刺条锦鸡儿>刺叶锦鸡儿>灰毛小叶锦鸡儿>中间锦鸡儿>树锦鸡儿(表 4)。

3 讨论

在整个生长发育过程中,环境对植物的形态建成起着重要作用,形态特征是植物适应环境的直接表现形式<sup>[16]</sup>,干旱是影响植物生长发育的重要因素之一,不同种植物受自身遗传特性与外界环境的共同影响,对干旱形成了不同的生态适应对策。植物叶片与外界进行水分和气体交换,承担着光合和蒸腾作用,是植物对逆境胁迫最敏感的部位,在复杂的外界环境中形成了特殊的结构与功能<sup>[17]</sup>,可较好地反映植物对干旱等逆境

条件的适应性。根据叶的生长状况和形态结构等特征可判断植物对环境的适应能力<sup>[18]</sup>,因此植物叶片常被植物生理学家用来作为主要研究对象<sup>[19]</sup>。



注:图中数字表示:1 南口锦鸡儿,2 狭叶锦鸡儿,3 荒漠锦鸡儿,4 中间锦鸡儿,5 边塞锦鸡儿,6 灰毛小叶锦鸡儿,7 多刺锦鸡儿,8 刺叶锦鸡儿,9 红花锦鸡儿,10 柠条锦鸡儿,11 鬼箭锦鸡儿,12 川西锦鸡儿,13 黄刺条锦鸡儿,14 甘蒙锦鸡儿,15 短脚锦鸡儿,16 粉刺锦鸡儿,17 树锦鸡儿。

图 2 17 种锦鸡儿属层次聚类分析结果

环境对叶片结构的影响主要体现在叶片厚度、上表皮细胞厚度、下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、主脉厚度、叶片结构紧密度、叶片结构疏松

度等方面。其中叶片厚度是植物的抗旱特征之一,吴林等<sup>[20]</sup>认为植物叶片越厚,保水能力越强,植株则越抗旱;徐扬等<sup>[21]</sup>认为叶片栅栏组织越发达,植株的抗旱性越强;任媛媛等<sup>[22]</sup>和刘红茹等<sup>[13]</sup>认为主脉中发达的维管束和强化的机械组织可以使植株更加抗旱。本研究结果发现:17 种锦鸡儿属植物抗旱机制各异,其中短脚锦鸡儿叶肉组织较疏松,但其表皮比较厚,叶片的储水、保水及抗旱能力则越强<sup>[23]</sup>;多刺锦鸡儿叶片厚度大且栅栏组织厚度也较大,抗旱性也较强,但表皮细胞厚度却小于短脚锦鸡儿,可见表皮细胞越厚可以更大程度的限制蒸腾的发生,增强抗旱能力;狭叶锦鸡儿主脉较发达、表皮厚度较大,以此来提高植物的抗旱性;川西锦鸡儿与粉刺锦鸡儿通过增加栅栏海比提高植物的抗旱性,但川西锦鸡儿发达的栅栏组织使它的组织结构紧密度增加,因此它的抗旱性更强;边塞锦鸡儿通过增加栅栏组织厚度提高植物的抗旱性。在叶肉结构从普通型过渡到环栅型的过程中,叶片厚度、栅栏组织、海绵组织等发生一系列的变化,使得不同锦鸡儿对干旱有不同的应对策略,这也是锦鸡儿属植物从东向西抗旱性增强,出现替代分布的重要原因之一<sup>—[24]</sup>。

表 2 17 种锦鸡儿属植物叶片解剖结构及主要特征

种名	叶肉组织类型	胞间隙	栅栏组织	海绵组织	主脉厚度	栅/海	上表皮/下表皮
南口锦鸡儿	普通型	较大	由 1~2 层柱形细胞规则排列而成	由规则细胞排列而成	较厚	1.4 : 1	1 : 1
狭叶锦鸡儿	环栅型	小	由 1~2 层长条状细胞紧密排列而成	由不规则细胞排列而成	厚	1 : 1	0.8 : 1
甘蒙锦鸡儿	普通型	小	由 1~2 层柱形细胞紧密排列而成	由不规则细胞排列而成	薄	1.3 : 1	1 : 1
短脚锦鸡儿	环栅型	大	由 2~3 层长条状细胞不规则排列而成	由不规则细胞排列而成	厚	1.7 : 1	1.3 : 1
荒漠锦鸡儿	环栅型	小	由 2~3 层柱形细胞规则排列而成	由不规则细胞排列而成	厚	1.7 : 1	1.2 : 1
边塞锦鸡儿	正常型向环栅型的过渡类型	较小	由 1~2 层长条状细胞排列而成	由不规则细胞排列而成	薄	1.9 : 1	1.2 : 1
树锦鸡儿	普通型	大	由 1~2 层柱形细胞排列而成	由不规则细胞排列而成	薄	1.3 : 1	1.1 : 1
红花锦鸡儿	普通型	较小	由 2~3 层短型细胞排列而成	由规则细胞排列而成	较厚	1.2 : 1	1.2 : 1
黄刺条锦鸡儿	普通型	较小	由 1~2 层柱形细胞排列而成	由规则细胞排列而成	较薄	1.3 : 1	1.2 : 1
多刺锦鸡儿	环栅型	小	由 1~2 层长条状细胞排列而成	由不规则细胞排列而成	较厚	1.9 : 1	1.1 : 1
刺叶锦鸡儿	正常型向环栅型的过渡类型	较小	由 1~2 层柱形细胞排列而成	由不规则细胞排列而成	较厚	1.1 : 1	1 : 1
灰毛小叶锦鸡儿	环栅型	小	由 1~2 层短型细胞规则排列而成	由不规则细胞排列而成	较厚	1.1 : 1	1 : 1
柠条锦鸡儿	正常型向环栅型的过渡类型	较小	由 1~2 层短型细胞排列而成	由不规则细胞排列而成	较厚	1.1 : 1	1.1 : 1
粉刺锦鸡儿	普通型	大	由 1~2 层柱形细胞排列而成	由规则细胞排列而成	较薄	2.5 : 1	1.1 : 1
中间锦鸡儿	普通型	大	由 1~2 层短型细胞排列而成	由规则细胞排列而成	较厚	0.9 : 1	0.9 : 1
鬼箭锦鸡儿	正常型向环栅型的过渡类型	较大	由 1~2 层柱形细胞排列而成	由不规则细胞排列而成	较厚	1.2 : 1	1 : 1
川西锦鸡儿	正常型向环栅型的过渡类型	较大	由 1~2 层柱形细胞排列而成	由不规则细胞排列而成	较厚	2.7 : 1	1.2 : 1

通过对 17 种锦鸡儿属植物进行聚类分析,可将不同种锦鸡儿属植物分为 2 类。层次聚类分析的第 1 类锦鸡儿中短脚锦鸡儿叶片厚度较小,但其依靠表皮细胞厚度以及栅栏组织厚度防止水分过分蒸发,使其适应干旱的环境<sup>[25]</sup>。多刺锦鸡儿表皮细胞厚度较

小,叶片厚度、栅栏组织厚度以及组织结构紧密度大,这些特征可以增强光合能力,提高光合效率,达到高效利用水分的能力<sup>[26]</sup>。边塞锦鸡儿虽主脉厚度较小,但其具有发达的栅栏组织,使得抗旱性增强。第 2 类锦鸡儿中狭叶锦鸡儿虽然栅栏组织厚度较小,但

其表皮细胞厚度大、主脉发达,主脉密度越高,抑制水分散失的能力越强,能够忍耐的最低水势也越低,则其抗旱能力越强<sup>[27]</sup>。川西锦鸡儿叶片厚度以及表皮

细胞厚度较小,其栅栏组织厚度以及组织结构紧密度较大,可提高水分利用效率,减少水分散失,使其抗旱性增强。

表 3 17 种锦鸡儿属植物叶片解剖结构特征数据 (n=6)

种名	叶片 厚度/ $\mu\text{m}$	上表皮细胞 厚度/ $\mu\text{m}$	下表皮细胞 厚度/ $\mu\text{m}$	栅栏组织 厚度/ $\mu\text{m}$	海绵组织 厚度/ $\mu\text{m}$	主脉 厚度/ $\mu\text{m}$	叶片结构 紧密度	叶片结构 疏松度
南口锦鸡儿	105.73±7.76i	15.15±0.90bc	14.36±1.14bcd	38.76±4.60efg	27.09±3.74fg	91.77±5.85d	0.37±0.03cd	0.26±0.53abc
狭叶锦鸡儿	180.01±3.52de	15.50±1.13bc	19.06±1.73a	48.49±3.36def	46.03±4.54bcde	125.16±7.33a	0.27±0.02h	0.26±0.03abc
甘蒙锦鸡儿	151.28±9.57efgh	15.21±2.23bc	15.22±1.21bc	52.91±1.80de	40.95±5.34cdef	57.23±3.16hi	0.35±0.03cdef	0.27±0.03ab
短脚锦鸡儿	211.55±8.98c	21.02±3.26a	16.52±1.47ab	96.18±3.80b	56.87±5.04ab	108.78±3.62b	0.46±0.03ab	0.27±0.03ab
荒漠锦鸡儿	247.44±39.44b	14.08±1.77bcde	12.01±0.73def	85.26±15.88bc	49.23±12.71bc	105.57±6.49bc	0.34±0.02defg	0.20±0.03cd
边塞锦鸡儿	256.00±11.60b	13.86±0.47bcde	12.04±1.24def	126.46±10.95a	67.88±8.71a	58.08±3.27hi	0.49±0.04a	0.27±0.03ab
树锦鸡儿	101.44±6.80i	11.62±0.58def	10.74±1.09efg	31.18±4.52g	23.82±3.09g	53.96±5.51i	0.31±0.04defgh	0.23±0.02bcd
红花锦鸡儿	156.38±4.54defg	15.76±1.04b	12.83±0.80cde	50.65±2.30de	40.97±2.67cdef	94.28±4.67cd	0.32±0.02defgh	0.26±0.02abc
黄刺条锦鸡儿	139.87±5.69gh	14.89±0.91bcd	12.85±1.18cde	50.00±5.46de	39.64±2.01cdef	64.82±2.53ghi	0.36±0.04cde	0.28±0.01ab
多刺锦鸡儿	302.91±10.79a	12.91±1.78bcdef	11.50±2.00defg	125.21±5.03a	65.81±9.63a	70.45±5.55fg	0.41±0.02bc	0.22±0.03bcd
刺叶锦鸡儿	124.49±7.56hi	14.15±1.85bcde	14.43±0.76bcd	35.83±5.21fg	33.52±5.55defg	73.12±2.08efg	0.29±0.03gh	0.27±0.03ab
灰毛小叶锦鸡儿	141.65±6.00gh	12.33±1.25cdef	11.65±1.39def	40.93±3.51defg	36.40±4.27cdefg	83.14±5.92de	0.29±0.02fgh	0.26±0.03abc
柠条锦鸡儿	178.94±26.93def	14.77±0.99bcd	12.86±1.95cde	55.01±7.38d	47.97±9.91bcd	75.20±9.82efg	0.31±0.01defgh	0.27±0.03ab
粉刺锦鸡儿	184.00±9.93cd	11.12±1.12ef	9.78±1.11fg	81.07±3.68c	33.03±5.01efg	66.60±4.24gh	0.44±0.03ab	0.18±0.02d
中间锦鸡儿	145.43±9.17gh	12.39±1.42bcdef	14.12±1.72bcd	39.79±5.31efg	45.32±6.70bcde	94.23±3.44cd	0.27±0.04h	0.31±0.03a
鬼箭锦鸡儿	150.84±5.90efgh	13.12±1.08bcdef	13.10±0.67cde	44.58±4.31defg	35.89±4.98cdefg	79.44±4.49ef	0.30±0.03efgh	0.24±0.03bcd
川西锦鸡儿	148.40±8.43fgh	10.34±1.52f	8.63±1.08g	73.50±3.66c	27.46±4.85fg	78.72±6.74ef	0.50±0.03a	0.19±0.03d

注:表中数据为均值±标准差,小写字 a—i 表示种间差异显著性 ( $p<0.05$ )。

表 4 17 种锦鸡儿属植物隶属函数值分析及排序

种名	叶片 厚度/ $\mu\text{m}$	上表皮细胞 厚度/ $\mu\text{m}$	下表皮细胞 厚度/ $\mu\text{m}$	栅栏组织 厚度/ $\mu\text{m}$	海绵组织 厚度/ $\mu\text{m}$	主脉 厚度/ $\mu\text{m}$	叶片结构 紧密度	叶片结构 疏松度	平均值	排序
短脚锦鸡儿	0.547	1.000	0.757	0.682	0.250	0.770	0.824	0.318	0.643	1
荒漠锦鸡儿	0.725	0.350	0.324	0.568	0.423	0.725	0.333	0.852	0.537	2
多刺锦鸡儿	1.000	0.241	0.275	0.987	0.047	0.232	0.638	0.713	0.517	3
狭叶锦鸡儿	0.390	0.483	1.000	0.182	0.496	1.000	0.000	0.423	0.497	4
川西锦鸡儿	0.233	0.000	0.000	0.444	0.917	0.348	1.000	0.957	0.487	5
粉刺锦鸡儿	0.410	0.073	0.110	0.524	0.791	0.178	0.763	1.000	0.481	6
边塞锦鸡儿	0.767	0.329	0.327	1.000	0.000	0.058	0.995	0.351	0.478	7
南口锦鸡儿	0.021	0.450	0.549	0.080	0.926	0.531	0.430	0.419	0.426	8
红花锦鸡儿	0.273	0.508	0.403	0.204	0.611	0.566	0.241	0.375	0.398	9
甘蒙锦鸡儿	0.247	0.456	0.631	0.228	0.611	0.046	0.362	0.308	0.361	10
鬼箭锦鸡儿	0.245	0.260	0.428	0.141	0.726	0.358	0.116	0.557	0.354	11
柠条锦鸡儿	0.385	0.415	0.405	0.250	0.452	0.298	0.168	0.329	0.338	12
黄刺条锦鸡儿	0.191	0.426	0.404	0.198	0.641	0.153	0.390	0.211	0.327	13
刺叶锦鸡儿	0.114	0.357	0.556	0.049	0.780	0.269	0.081	0.320	0.316	14
灰毛小叶锦鸡儿	0.200	0.186	0.289	0.102	0.714	0.410	0.086	0.413	0.300	15
中间锦鸡儿	0.218	0.192	0.527	0.090	0.512	0.566	0.019	0.000	0.265	16
树锦鸡儿	0.000	0.120	0.202	0.000	1.000	0.000	0.172	0.582	0.259	17

植物的抗旱性是一个复杂的、受多重因素影响的综合特性<sup>[28]</sup>,因此,锦鸡儿属不同植物的抗旱机制也不尽相同,每种植物仅凭某一项指标进行评价抗旱性具有片面性<sup>[22]</sup>。因此使用基于模糊数学原理的隶属函数法进行抗旱性研究分析,其结果更加准确客观。

本研究结果显示:短脚、荒漠和狭叶锦鸡儿表现出较强的抗旱性,这与李蒙蒙等<sup>[1]</sup>基于叶片微形态结构评价锦鸡儿属植物的抗旱性得到的研究结果一致,且叶片厚度、表皮细胞厚度与主脉厚度随着抗旱性的增强逐渐变厚;柠条锦鸡儿比中间锦鸡儿与灰毛小叶锦鸡



儿抗旱性强,这是由于柠条锦鸡儿的叶片厚度与表皮细胞厚度更大,这与李晶<sup>[29]</sup>研究输水结构与抗旱性所得出的结果一致;荒漠、中间、柠条和树锦鸡儿的抗旱性,与周萌<sup>[30]</sup>以形态适应特征和生理机制对锦鸡儿研究所得出的结果不完全一致。这是因为植物在生长发育的过程中受到多种因素的影响,且植物适应干旱环境是一个复杂的形态特征和生理生化的协调过程。目前,柠条锦鸡儿和中间锦鸡儿已在典型荒漠带沙地、荒漠化草原中大量种植,且取得了较好的生态效益<sup>[31]</sup>;而本试验结果表明:短脚锦鸡儿、荒漠锦鸡儿、狭叶锦鸡儿和刺叶锦鸡儿抗旱性强,可以在年降雨量少,蒸发量大的荒漠地区种植;川西锦鸡儿、粉刺锦鸡儿与南口锦鸡儿也表现出了较强的抗旱性,在以后的干旱区植被恢复建设中种植,来增加群落物种的多样性。

该研究对西北干旱地区植被建设与生态环境具有重要的作用。因此不论是依据形态特征还是生理特征来判断植物的抗旱性,都有一定的局限性。不同锦鸡儿植物的抗旱机制不同,因此在以后的研究过程中应综合主要指标且从各方面来衡量每种植物的抗旱性。

## 4 结论

17 种锦鸡儿属植物叶肉解剖结构表现出 3 种不同类型,在抗旱性增强的过程中,叶肉结构从普通型、过渡型、环栅型依次过渡,在此过程中叶片逐渐变厚,栅栏组织、主脉越来越发达、叶片紧密度增强;聚类分析将 17 种锦鸡儿依据各自不同特征聚为 2 类;根据隶属函数法对 17 种锦鸡儿抗旱能力大小进行排序,结果为:短脚锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>多刺锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>川西锦鸡儿>粉刺锦鸡儿>边塞锦鸡儿>南口锦鸡儿>红花锦鸡儿>甘蒙锦鸡儿>鬼箭锦鸡儿>柠条锦鸡儿>黄刺条锦鸡儿>刺叶锦鸡儿>灰毛小叶锦鸡儿>中间锦鸡儿>树锦鸡儿。

### 参考文献:

- [1] 李蒙蒙,刘丹,刘玉冰.基于叶片微形态结构评价 10 种锦鸡儿属(*Caragana*)植物的抗旱特征[J].中国沙漠,2016,36(3):708-717.
- [2] Meng Q, Niu U Y, Niu X, et al. Ethnobotany, phytochemistry and pharmacology of the genus *Caragana* used in traditional Chinese medicine [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2009,124(3):350-368.
- [3] 张媛媛,马成仓,韩磊,等.内蒙古高原荒漠区 4 种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较[J].生态学报,2012,32(11):3343-3351.
- [4] Zan W, Gao H, Han J, et al. Allozyme Diversity and Population Structure of *Caragana korshinskyi* Kom. in China[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2006, 53(8):1689-1697.
- [5] 赵伟男.锦鸡儿属植物地理替代分布种光合干旱适应与复水恢复[D].兰州:兰州大学,2016.
- [6] Haichao W, Chunguang W, Xiao H E, et al. The response of *caragana stenophylla* pojark leaf anatomical structure to desert grassland deterioration gradient under the drought stress [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016,25(5):744-751.
- [7] Zhao T T, Zhao N X, Gao Y B. Ecophysiological response in leaves of *Caragana microphylla* to different soil phosphorus levels [J]. Photosynthetica, 2013, 51(2): 245-251.
- [8] Wang X M, Zan W, Jie D, et al. Cloning of a 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase gene and the responses of *Caragana korshinskii* to a variety of abiotic stresses [J]. Genes and Genetic Systems, 2009,84(6):397-405.
- [9] Zhang M, Fritsch P W, Cruz B C. Phylogeny of *Caragana*(Fabaceae)based on DNA sequence data from *rbcl*, *trnS-trnG*, and ITS [J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 2009,50(3):547-559.
- [10] 段永红,李素清,牛西午,等.锦鸡儿属植物 4 个种的核型分析[J].植物科学学报,2006,24(5):413-417.
- [11] Chen P, Meng P, Zhang J S, et al. Effects of drought stress on growth and water use efficiency of two medicinal plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014,25(5):1300-1306.
- [12] Hu Y, Schmidhalter U. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants [J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2010, 168(4):541-549.
- [13] 刘红茹,冯永忠,王得祥,等.延安 5 种木犀科园林植物叶片结构及抗旱性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(2):75-81.
- [14] Liu Q, Li Z H, Ji W U. Research progress on leaf anatomical structures of plants under drought stress [J]. Agricultural Science and Technology, 2016,17(1):4-7.
- [15] Liu Y, Li X, Chen G, et al. Correction: Epidermal micromorphology and mesophyll structure of *populus euphratica* heteromorphic leaves at different development stages [J]. Plos One, 2015,10:e0141578.
- [16] 侯艳伟,王迎春,杨持,等.绵刺(*Potania mongolica*)劈裂生长的形态发生及内部解剖结构特征的研究[J].中国沙漠,2006,26(2):254-258.
- [17] England J R, Attiwill P M. Changes in leaf morphology and anatomy with tree age and height in the broad-leaved evergreen species, *Eucalyptus regnans* F. Muell [J]. Trees(Berlin),2006,20(1):79-90.

## 参考文献:

- [1] Lipczynska-Kochany E. Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 640: 1548-1565.
- [2] Fanzo J, Davis C, McLaren R, et al. The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes[J]. Global Food Security, 2018, 18: 12-19.
- [3] 王晓宇. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业与技术, 2018, 38(21): 150-151.
- [4] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 回顾 IPCC 30 年(1988—2018 年)[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 108-114.
- [5] Shi J, Cui L, Wang J, et al. Changes in the temperature and precipitation extremes in China during 1961—2015 [R]. Quaternary International, 2018.
- [6] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.
- [7] 任国玉, 郭军, 徐铭志. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [8] Shi C, Jiang Z, Chen W, et al. Changes in temperature extremes over China under 1.5°C and 2°C global warming targets[J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 9(2): 120-129.
- [9] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 中国东北地区近百年气温序列的小波分析[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 122-125.
- [10] 曾小凡, 李巧萍, 苏布达, 等. 松花江流域气候变化及 ECHAM5 模式预估[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 215-219.
- [11] 孙文, 范昊明. 全球变暖背景下松花江流域气温最新变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 97-104.
- [12] 杜军, 马鹏飞, 潘多. 1981—2014 年西藏各时次气温的变化趋势分析[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 422-432.
- [13] Hamed K H, Rao A R. A modified mann-kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1/4): 182-196.
- [14] 王文圣, 丁晶, 金菊良. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [15] 佟金鹤. 1965—2014 年我国温度和降水变化趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 229-235.
- [16] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [17] 师长兴, 周园园, 范小黎, 等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1361-1369.
- [18] 李芳兰, 包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应[J]. 植物学通报, 2005, 22(S1): 118-127.
- [19] 周智彬, 李培军. 我国旱生植物的形态解剖学研究[J]. 干旱区研究, 2002, 19(2): 35-40.
- [20] 吴林, 霍焰, 聂小兰, 等. 沙棘叶片组织结构观察及其与抗旱性关系的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(4): 390-393.
- [21] 徐扬, 陈小红, 赵安玖. 川西高原 4 种苹果属植物叶片解剖结构与其抗旱性分析[J]. 西北植物学报, 2015, 35(11): 2227-2234.
- [22] 任媛媛, 刘艳萍, 王念, 等. 9 种屋顶绿化阔叶植物叶片解剖结构与抗旱性的关系[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(4): 64-68.
- [23] 潘昕, 邱权, 李吉跃, 等. 基于叶片解剖结构对青藏高原 25 种灌木的抗旱性评价[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 61-68.
- [24] 燕玲, 李红, 刘艳. 13 种锦鸡儿属植物叶的解剖生态学
- 研究[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1): 100-106.
- [25] 梁颖. 内蒙古荒漠区锦鸡儿遗传多样性分析[D]. 呼和浩特, 内蒙古大学, 2018.
- [26] 赵小仙, 李毅, 苏世平, 等. 3 个地理种群蒙古沙拐枣同化枝解剖结构及抗旱性比较[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1293-1300.
- [27] 姚广前, 魏阳, 毕敏慧, 等. 干旱胁迫下 4 种锦鸡儿属植物叶脉密度与最低水势关系[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1252-1258.
- [28] 李洁, 周春娥, 梁志英, 等. 干旱胁迫对乌头部分生理指标的影响[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 93-100.
- [29] 李晶. 内蒙古高原 3 种锦鸡儿植物(*Caragana*)输水结构与抗旱性的相关研究[D]. 天津, 南开大学, 2008.
- [30] 周萌. 锦鸡儿属响应干旱胁迫的形态适应特征和生理机制的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [31] 赵一之. 小叶、中间和柠条 3 种锦鸡儿的分布式样及其生态适应[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3411-3414.

(上接第 346 页)