

DOI: 10.5846/stxb201306041317

解李娜, 魏亚冉, 马成仓, 李清芳, 高玉葆. 内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属植物水力结构的变化. 生态学报, 2015, 35(6): 1672-1678.

Xie L N, Wei Y R, Ma C C, Li Q F, Gao Y B. Variation in hydraulic architecture of four *Caragana* species in the desert region on the Inner Mongolian Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1672-1678.

内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属植物水力结构的变化

解李娜, 魏亚冉, 马成仓, 李清芳*, 高玉葆

天津师范大学, 生命科学学院, 天津市动植物抗性重点实验室, 天津 300387

摘要: 采用改良的冲洗法, 比较了内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属 (*Caragana*) 4 种优势植物——柠条锦鸡儿 (*C. korshinskii*)、狭叶锦鸡儿 (*C. stenophylla*)、垫状锦鸡儿 (*C. tibetica*) 和荒漠锦鸡儿 (*C. roborovskii*) 的水力结构日变化和季节变化, 目的是了解 4 种锦鸡儿属植物对荒漠区环境的适应性及其差异。研究发现: 4 种锦鸡儿属植物的比导率、叶比导率均为早晚高、中午低的单谷日变化曲线; 3 个季节相比较, 夏季的比导率、叶比导率最大; 胡伯尔值春季 > 夏季 > 秋季。3 个季节比导率日平均值、夏季和秋季的叶比导率、3 个季节的胡伯尔值都表现为: 柠条锦鸡儿 > 荒漠锦鸡儿 > 狭叶锦鸡儿 > 垫状锦鸡儿; 3 个季节比导率日变幅和春季叶比导率表现为: 柠条锦鸡儿 > 荒漠锦鸡儿 > 垫状锦鸡儿 > 狭叶锦鸡儿。4 个种比导率日平均值的季节变幅相似。这些结果表明: (1) 荒漠区锦鸡儿属植物的水力结构限制了水分运输, 使其避免了中午的高蒸腾。(2) 荒漠区锦鸡儿属植物通过较高的水分运输效率及较好的叶供水效率适应夏季的高温 and 强辐射, 维持水分平衡; 锦鸡儿属植物胡伯尔值的季节变化保证了其在春、夏季快速生长期有较好的水分供应。(3) 较高的比导率、叶比导率和胡伯尔值导致了柠条锦鸡儿良好的水分供应和高蒸腾速率, 进而导致了柠条锦鸡儿较快的生长速度, 这说明柠条锦鸡儿对荒漠环境的适应性好于其它 3 个种; 柠条锦鸡儿的输水效率高, 但易发生严重的空穴和栓塞。

关键词: 锦鸡儿属; 荒漠区; 水力结构; 季节变化; 日变化

Variation in hydraulic architecture of four *Caragana* species in the desert region on the Inner Mongolian Plateau

XIE Lina, WEI Yaran, MA Chengcang, LI Qingfang*, GAO Yubao

Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: *Caragana* species are able to survive in the stressful climatic conditions (e.g. very limited precipitation, high temperature and strong solar radiation) within the desert region on the Inner Mongolian Plateau through ecological adaptations to the environment. In the desert region, precipitation has the most important influence on plant growth and development. In order to understand how *Caragana* species are adapted to the arid desert environment, we investigated daily and seasonal variation in the hydraulic architecture (specific conductivity, leaf specific conductivity and Huber value) of four dominant *Caragana* species (*Caragana korshinskii*, *C. stenophylla*, *C. tibetica* and *C. roborovskii*), which grow in the desert region on the Inner Mongolian Plateau. We examined the hydraulic architecture of these *Caragana* species using the improved flushing method. The results showed that there was significant daily and seasonal variation in the hydraulic architecture of the four *Caragana* species. For all four *Caragana* species, the specific conductivity and leaf specific conductivity were high in the morning and afternoon and low at noon, showing a curve with single valley. Specific conductivity and leaf specific conductivity were highest in the summer, while Huber values were highest in spring, lower in summer, and lowest in autumn. There was also significant interspecific variation in hydraulic architecture among the four

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170381)

收稿日期: 2013-06-04; 修订日期: 2013-10-28

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

Caragana species. For daily averages of specific conductivity in the three seasons, leaf specific conductivity in summer and autumn, and Huber value in the three seasons, our results followed the pattern: *C. korshinskii* > *C. roborovoskyi* > *C. tibetica* > *C. stenophylla*. For diurnal variation extent of specific conductivity in the three seasons, and leaf specific conductivity in the spring, our results followed the pattern: *C. korshinskii* > *C. roborovoskyi* > *C. stenophylla* > *C. tibetica*. Seasonal variation extent of the daily average of specific conductivity was similar among the four *Caragana* species. Based on our results, we drew the following conclusions: (1) The hydraulic architecture of the four desert *Caragana* species limited water transport, which might decrease transpiration at noon. (2) *Caragana* species might be adapted to high temperatures and strong solar radiation through high water transport efficiency and better water supply to leaves to maintain relatively stable water status. The seasonal variation in Huber values ensured better water supplies to the four *Caragana* species in the spring and summer, when these species grew relatively rapidly. (3) Among the four *Caragana* species, *C. korshinskii* had the highest specific conductivity, leaf specific conductivity and Huber values, resulting in better water supply and higher transpiration rates, and thereby faster growth rates, which suggests that *C. korshinskii* is better adapted to the desert environment than the other three *Caragana* species. However, although *C. korshinskii* had higher water transpiration efficiency, this species was more prone to having serious cavitation and embolism.

Key Words: *Caragana*; desert; hydraulic architecture; seasonal variation; diurnal variation

锦鸡儿属(*Caragana*)约有 100 余种,主要分布于亚洲大陆温带地区与青藏高原,属温带亚洲分布型^[1,2]。锦鸡儿属植物抗寒、抗旱,不仅可防风固沙、保持水土^[3],同时还具有广泛的应用价值,因此对其的研究越来越引起人们的关注。

干旱缺水是影响内蒙古高原西部荒漠区植物生长发育的主要因子。作为荒漠区的优势种,锦鸡儿属植物如何在水资源严重匮乏的干旱地区,充分利用水资源,增强对干旱环境的适应性,改善生态环境,已成为重要的生理生态学研究课题。许多学者已经进行了大量的研究。李彦瑾等^[4]研究了柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*) 在持续干旱胁迫下水分生理特性;王孟本等^[5]研究了柠条锦鸡儿水分生理生态学特性;作者曾报道了内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属优势种的形态适应特征^[6]、生理生态适应特征^[7],并比较了小叶锦鸡儿(*C. microphylla*)和狭叶锦鸡儿(*C. stenophylla*)的生态和水分调节特性^[8]、光合特性和保护酶系统^[9]。

水力结构是指植物在特定的自然环境下,为适应生存竞争的需要所形成的不同形态结构和水分运输供给策略^[10-12]。从水力结构(比导率(K_s)、叶比导率(LSC)、胡伯尔值(Hv))特征可以认识植物体内水分运输的特点,从而阐明植物的耐旱机理,因此,研究锦鸡儿属植物的水力结构对于认识它们对干旱环境的适应策略至关重要。李晶^[13]等比较了柠条锦鸡儿、中间锦鸡儿(*C. davazamcii*)、小叶锦鸡儿的水力结构特征及其对环境因子的响应;我们曾报道了柠条锦鸡儿在不同天气下^[14]和不同部位茎段的水力结构特征^[15]。本文对分布于内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属 4 个优势种(柠条锦鸡儿、狭叶锦鸡儿、垫状锦鸡儿(*C. tibetica*)和荒漠锦鸡儿(*C. roborovoskyi*))水力结构的季节变化进行比较研究,以了解 4 种锦鸡儿属植物对荒漠区环境的适应性及其差异,为有效利用锦鸡儿属植物资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 自然概况

研究在内蒙古高原荒漠区阿拉善左旗进行。阿拉善左旗位于东经 105.34°,北纬 37.87°,平均海拔 800—1500 m。其属于温带干旱荒漠区,为典型的大陆型气候,以风沙大、干旱少雨、日照充足、蒸发强烈为主要特点。年降雨量 80—220 mm,年蒸发量 2900—3300 mm。年日照时间 3096 h,年总辐射量 628.1—669.9 kJ/cm²,年平均气温 7.2 °C,无霜期 120—180 d。柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)、狭叶锦鸡儿(*C. stenophylla*)、垫状锦鸡儿(*C. tibetica*)和荒漠锦鸡儿(*C. roborovoskyi*)为该地区的优势种。

1.2 研究方法

于2008年7月(夏季)、2009年4月下旬至5月上旬(春季)和9月(秋季)在阿拉善左旗根达莱分别选取15—25a、自然生长、无灌溉、生长良好、立地条件基本一致的柠条锦鸡儿、狭叶锦鸡儿、垫状锦鸡儿和荒漠锦鸡儿灌丛各8株作为样株。选择晴天,从7:00至19:00每2h在每株灌丛中选择生长在树冠中部向阳方向的一年生健康枝条1枝(每种共8枝,即重复8次),迅速用枝剪剪下、用湿布包好,放入盛有湿滤纸的容器中带回室内,在水中剪下长约5cm,直径约3mm的茎段,进行水力结构参数测定。

水力结构参数的测定采用改良的冲洗法^[16],所用冲洗液为10mmol/L的草酸溶液,压力梯度(ΔP)定义为水压MPa除以茎段长度(L)。茎段末端的叶干重用烘干法(105℃,8h)测定^[17]。单位压力梯度下的导水率(Kh)等于通过一个离体茎段的水流量(F)与该茎段引起水流动的压力梯度(dp/dx)的比值;比导率(Ks)是指单位茎段边材横截面积的导水率(Kh),将导水率(Kh)除以茎段边材横截面积(对于1年生枝条即为茎段横截面积, Aw, m^2);叶比导率(LSC)是茎段末端叶供水情况的重要指标,由导水率(Kh)除以茎段末端的叶干重(g)得到;胡伯尔值(Hv)为茎木材横截面积除以茎段末端的叶干重。同时使用Li-6400光合仪同步测量光照、温度、空气相对湿度等气候因子(图1)。

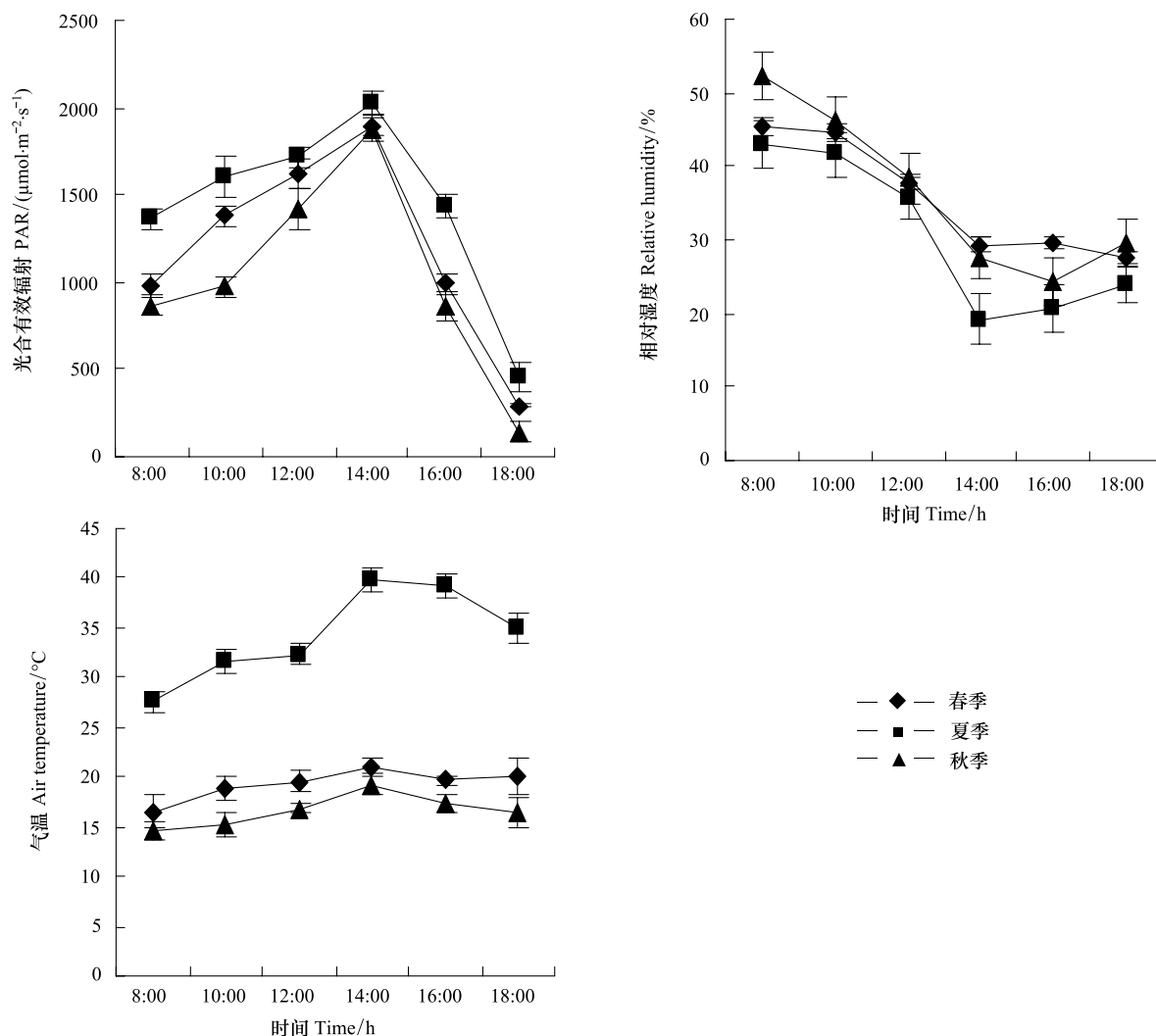


图1 不同季节光合有效辐射、气温、相对湿度的日变化

Fig.1 Diurnal variation of photosynthetic active radiation (PAR), air temperature, relative humidity in different reasons (mean±SE)

数据统计用 SPSS17.0 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同季节比导率的日变化

比导率(K_s)是指单位茎段边材横截面积的导水率(Kh),它反映了植物各部分的输水效率。比导率越大,则说明该部分输水效率越高,单位有效面积的输水能力越强^[10,18]。从图 2 可以看出,4 种锦鸡儿属植物比导率的日变化基本一致,都是早晚高,中午低。4 种锦鸡儿属植物的比导率都有不同程度的季节变化,均为夏季最高,春、秋两季差异不大,说明四种锦鸡儿属植物夏季的输水效率最高。

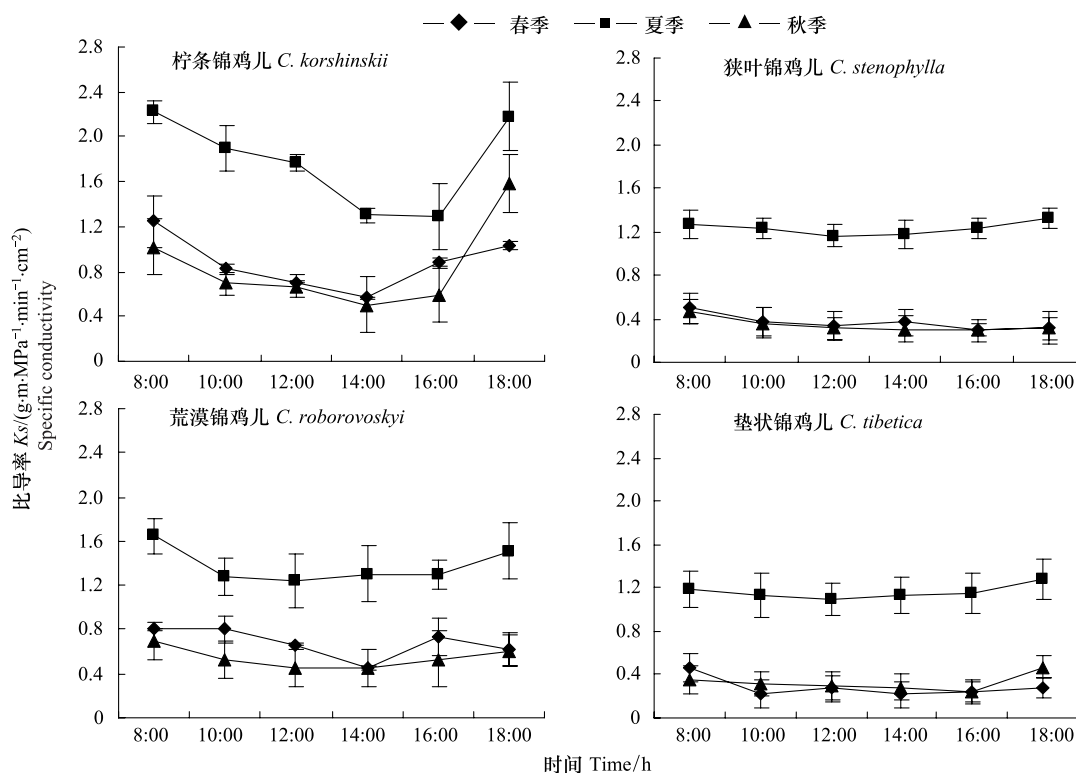


图 2 不同季节 4 种锦鸡儿属植物一年生枝条比导率的日变化

Fig.2 Diurnal variation of specific conductivity (K_s) in one-year-old twigs of the four *Caragana* species in different seasons (mean $\pm$ SE)

虽然 4 种锦鸡儿属植物在不同季节的日变化趋势相同,但不同种之间比导水率的大小和日变幅存在差异。3 个季节比导水率日平均值都表现为:柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>垫状锦鸡儿;日变幅($K_{s_{max}} - K_{s_{min}}$)都表现为:柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>垫状锦鸡儿>狭叶锦鸡儿(表 1)。4 个种比导水率日平均值的季节变幅相似(表 1)。

2.2 不同季节叶比导率的日变化

叶比导率(LSC)反映茎段末端的叶供水效率, LSC 值越大,说明茎段末端单位叶生物量的供水情况越好。由图 3 可以看出,4 种锦鸡儿属植物叶比导率与比导率具有相同的日变化趋势,均为早晚高,中午低。4 种锦鸡儿属植物叶比导率也与比导率季节变化规律相似,均为夏季高于春秋两季。

不同种植物叶比导率具有较大的差异。春季叶比导率表现为:柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>垫状锦鸡儿>狭叶锦鸡儿;夏季和秋季表现为:柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>垫状锦鸡儿。

表 1 4 种锦鸡儿属植物在不同季节比导水率的日变化参数

Table 1 The diurnal variations of specific conductivity in one-year-old twigs of four <i>Caragana</i> species in different seasons								
种 Species	柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>				狭叶锦鸡儿 <i>Caragana stenophylla</i>			
季节 Season	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季节变幅 Seasonal variation extent	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季节变幅 Seasonal variation extent
$K_{s_{\max}}$	1.247	2.225	1.579		0.496	1.327	0.467	
$K_{s_{\min}}$	0.568	1.297	0.502		0.296	1.166	0.296	
$K_{s_{\max}}-K_{s_{\min}}$	0.679	0.928	1.077		0.200	0.161	0.171	
日平均值 Mean	0.875bA	1.756aA	0.841bA	0.915	0.363bC	1.246aC	0.341bC	0.905

种 Species	荒漠锦鸡儿 <i>Caragana roborovoskyi</i>				垫状锦鸡儿 <i>Caragana tibetica</i>			
季节 Season	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季节变幅 Seasonal variation extent	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季节变幅 Seasonal variation extent
$K_{s_{\max}}$	0.807	1.646	0.692		0.464	1.280	0.471	
$K_{s_{\min}}$	0.445	1.242	0.445		0.216	1.097	0.238	
$K_{s_{\max}}-K_{s_{\min}}$	0.362	0.404	0.247		0.248	0.183	0.233	
日平均值 Mean	0.683bB	1.459bB	0.543bB	0.916	0.283bD	1.188aC	0.328bC	0.905

不同字母(小写字母:季节间;大写字母:种间)表示差异显著 (Tukey HSD 检验, $P < 0.05$)

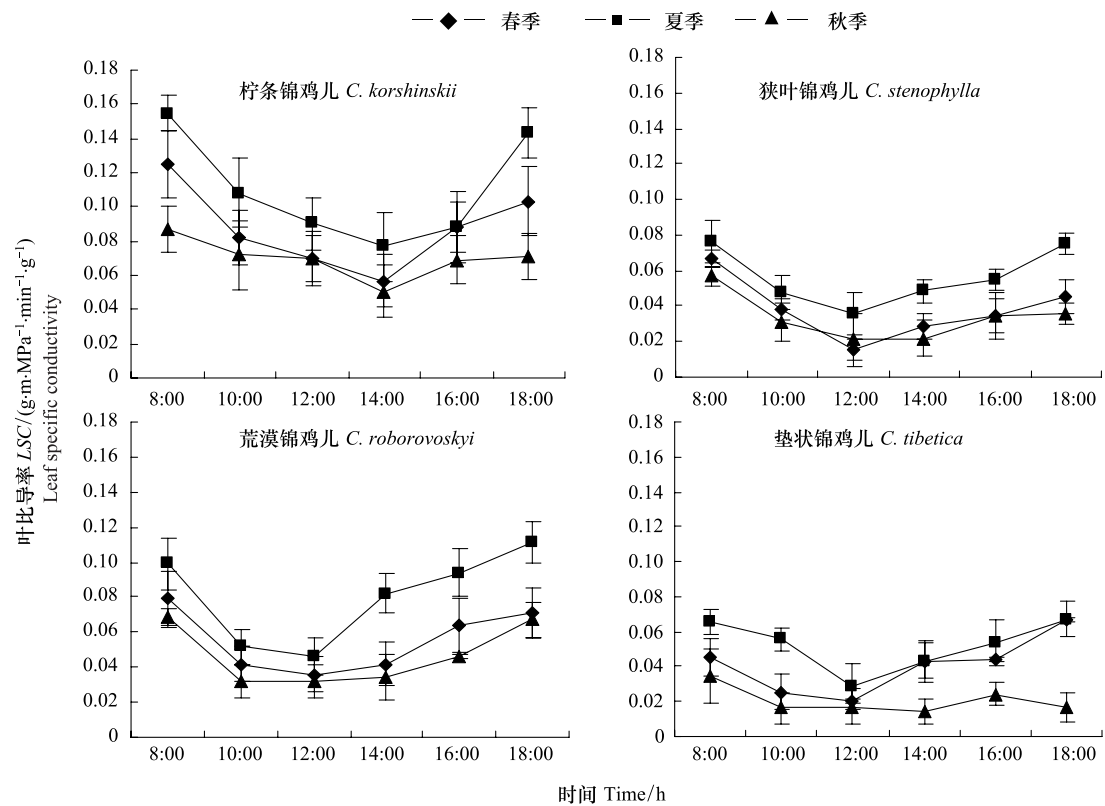


图 3 不同季节 4 种锦鸡儿属植物一年生枝条叶比导率的日变化

Fig.3 Diurnal variation of leaf specific conductivity (LSC) in one-year-old twigs of the four *Caragana* species in different seasons (mean±SE)

2.3 不同季节胡伯尔值的日平均值

胡伯尔值(H_v)反映单位叶生物量的茎组织投入量, H_v 越大,说明维持单位叶生物量水分所需茎组织的

投入量越大^[11]。如图 4 所示,4 种锦鸡儿属植物的胡伯尔值都是春季>夏季>秋季。不同种之间胡伯尔值存在明显差异,3 个季节都表现为:柠条锦鸡儿>荒漠锦鸡儿>狭叶锦鸡儿>垫状锦鸡儿。

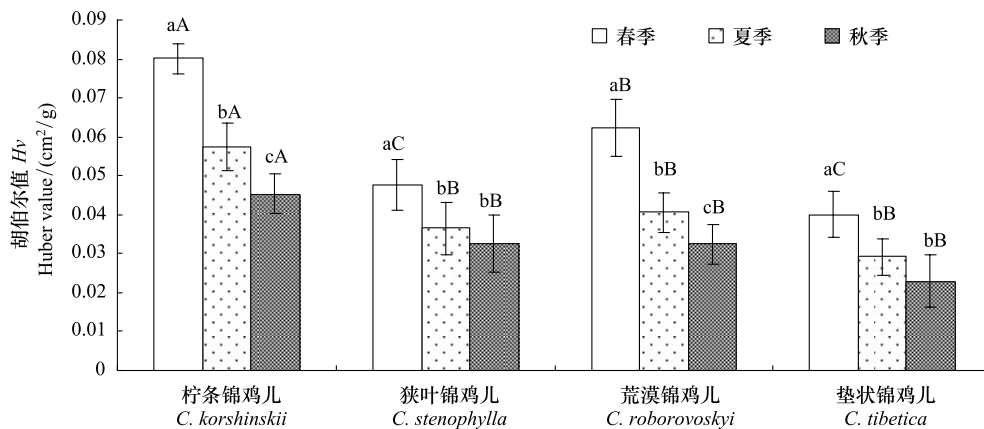


图 4 不同季节四种锦鸡儿属植物一年生枝条胡伯尔值的日平均值

Fig.4 Daily average value of Huber Value (H_v) in one-year-old twigs of the four *Caragana* species in different seasons (mean±SE)

不同字母(小写字母:季节间;大写字母:种间)表示差异显著(Tukey HSD 检验, $P < 0.05$)

3 讨论

刘晓燕等^[18]研究发现刺槐等植物的水力结构有一定程度的日变幅。翟洪波^[19]等研究表明油松、侧柏、元宝枫、栓皮栎也有相似的日变化趋势。本文研究表明 4 种锦鸡儿属植物的比导率、叶比导率同样存在明显的日变化,都为早晚高、中午低。这是由于清晨空气相对湿度较高,植物体内水分状况良好,所以比导率较高;随着中午太阳辐射增强,温度升高,蒸腾能力增强^[20],植物体内水分输导组织空穴和栓塞加重,因此比导率下降;下午水分状况有所恢复,比导率逐渐升高。中午荒漠区锦鸡儿属植物的水力结构限制了水分运输,使其避免了中午的高蒸腾。这些结果说明荒漠区 4 种锦鸡儿属植物的蒸腾速率和气孔导度的午降现象^[20]是由水分输导能力的变化引起的,而水分输导能力的变化与输导组织空穴和栓塞程度有关,这是荒漠区植物的水分特性之一。

植物在生长发育期间水力结构不仅具有日变化规律,同时具有季节变化规律,且不同植物的季节变化规律不尽相同。刘晓燕^[21]等发现侧柏、华山松等树种比导率、叶比导率春季最低,夏季最大。本文研究结果表明 4 种锦鸡儿属植物夏季比导率、叶比导率最大,春、秋两季差异不大。荒漠区夏季温度高,空气水分亏缺大,蒸腾能力强,锦鸡儿属植物通过较高的水分运输效率及较好的叶供水效率减少蒸腾失水引起的水分亏缺^[7],避免叶温过高引起损伤。胡伯尔值反映了单位叶生物量的茎组织投入量。4 种锦鸡儿属植物胡伯尔值春季最大,秋季最小。这是因为锦鸡儿属植物是落叶灌木,春季叶片开始生长,生物量较小,经过整个生长季,到秋季叶片生物量积累到最高;虽然茎段直径也在增加,但其增加比例不及叶片生物量积累比例。这种胡伯尔值季节变化确保植物在春、夏季快速生长季节有较多的水分运输投入,从而确保气孔开放进行光合作用;相反,在秋季生长季末期避免水分损失过多。胡伯尔值的季节变化特性能使锦鸡儿属植物更好地适应荒漠环境。

4 种锦鸡儿属植物的水力结构特征存在种间差异。柠条锦鸡儿比导率、叶比导率和胡伯尔值远大于其它 3 种,这可能是其蒸腾速率高于其它 3 种^[20]的原因之一。良好的水分供应也使柠条锦鸡儿生长速度快于其它 3 种^[6]。这些说明柠条锦鸡儿对荒漠环境的适应性好于其它 3 个种。除此之外,4 个种的水分输导效率也与它们的生长速率^[6]显示显著正相关关系(春季、夏季比导率 $P < 0.05$),说明对水分的适应是荒漠区植物适应荒漠环境的主要特性。柠条锦鸡儿在 3 个季节导水率的日变幅都最大;较大的日变幅预示着柠条锦鸡儿易发生严重的空穴和栓塞,这也说明了植物输水结构的有效性和安全性不可完全兼得。

参考文献 (References):

- [1] 赵一之. 内蒙古锦鸡儿属的分类及其生态地理分布. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 1991, 22(2): 264-273.
- [2] 周道玮. 锦鸡儿属植物分布研究. 植物研究, 1996, 16(4): 428-435.
- [3] 牛西午. 柠条研究. 北京: 科学出版社, 2003: 9-11.
- [4] 李彦瑾, 赵忠, 孙德祥, 韩刚. 干旱胁迫下柠条锦鸡儿的水分生理特征. 西北林学院学报, 2008, 23(3): 1-4.
- [5] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 柠条 (*Caragana korshinskii*) 的水分生理生态学特性. 植物生态学报, 1996, 20(6): 494-501.
- [6] 马成仓, 高玉葆, 郭宏宇, 吴建波, 王金龙. 内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属 (*Caragana*) 优势种的形态适应特征. 生态学报, 2006, 26(7): 2308-2312.
- [7] 马成仓, 高玉葆, 李清芳, 郭宏宇, 吴建波, 王金龙. 内蒙古高原荒漠区几种锦鸡儿属 (*Caragana*) 优势植物的生理生态适应特性. 生态学报, 2007, 27(11): 4643-4650.
- [8] 马成仓, 高玉葆, 蒋福全, 王金龙, 郭宏宇, 吴建波, 苏丹. 小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿的生态和水分调节特性比较研究. 生态学报, 2004, 24(7): 1442-1451.
- [9] 马成仓, 高玉葆, 王金龙, 郭宏宇, 聂莉莉, 赵娟. 小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿的光合特性及保护酶系统比较. 生态学报, 2004, 24(8): 1594-1601.
- [10] 李吉跃, 翟洪波. 木本植物水力结构与抗旱性. 应用生态学报, 2000, 11(2): 301-305.
- [11] Tyree M T, Ewers F W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. New Phytologist, 1991, 119(3): 345-360.
- [12] Zimmermann M H. Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. Canadian Journal of Botany, 1978, 56(18): 2286-2295.
- [13] 李晶, 高玉葆, 郑志荣, 高增璐. 内蒙古高原不同生境三种锦鸡儿属植物的水力结构特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2007, 27(3): 838-845.
- [14] 魏亚冉, 马成仓, 齐书香. 不同气候条件下柠条锦鸡儿水力结构特征比较. 干旱区研究, 2010, 27(3): 363-368.
- [15] 解李娜, 魏亚冉, 李清芳, 满良, 马成仓. 柠条锦鸡儿不同部位茎段水力结构特征的比较研究. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2012, 32(2): 66-68.
- [16] Sperry J S, Donnelly J R, Tyree M T. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. Plant, Cell & Environment, 1988, 11(1): 35-40.
- [17] 翟洪波, 李吉跃, 姜金璞. 干旱胁迫对油松侧柏苗木水力结构特征的影响. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 46-49.
- [18] 刘晓燕, 李吉跃, 翟洪波. 10 种木本植物水力结构特征春季变化规律. 北京林业大学学报, 2004, 26(1): 35-40.
- [19] 翟洪波, 李吉跃, 姜金璞. 元宝枫栓皮栎苗木水力结构特征的对比研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 46-50.
- [20] Ma C C, Gao Y B, Guo H Y, Wang J L, Wu J B, Xu J S. Physiological adaptations of four dominant *Caragana* species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau. Journal of Arid Environments, 2008, 72(3): 247-254.
- [21] 刘晓燕, 苗爱梅, 李吉跃. 树木水力结构特征季节变化规律研究. 河北林果研究, 2009, 24(2): 125-130.