

DOI: 10.5846/stxb201903190512

侯东杰, 刘长成, 乔鲜果, 陆帅志, 郭柯. 基于叶片水势的内蒙古典型草原植物水分适应特征. 生态学报, 2020, 40(8): - .  
Hou D J, Liu C C, Qiao X G, Lu S Z, Guo K. The adaptability of plants to water based on leaf water potential in typical steppe in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): - .

## 基于叶片水势的内蒙古典型草原植物水分适应特征

侯东杰<sup>1,2</sup>, 刘长成<sup>1</sup>, 乔鲜果<sup>1,2</sup>, 陆帅志<sup>1,2</sup>, 郭柯<sup>1,2,\*</sup>

1 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**水分是限制草原生态系统植物生存、繁殖和扩散最重要的生态因子,植物通过多样的水分适应策略适应干旱环境。为了解典型草原植物水势特征及其影响因素,在2017年和2018年的生长季对内蒙古典型草原71种植物的叶片黎明水势、午后水势、叶片和根系功能性状进行了测定与分析。结果表明:测定的71种植物叶片的黎明水势分布于-2.67—-0.63 Mpa,午后水势分布于-4.67—-1.01 Mpa;一年生植物的叶片具有最高的黎明水势、午后水势和最小的水势日差值(叶片的黎明水势与午后水势的差值),多年生禾草的叶片具有最低的黎明水势、午后水势和最大的水势日差值;71种植物对水分的适应策略可分为高水势保持型、低水势忍耐型和变水势波动型;叶片午后水势与叶片干物质含量和根系深度呈极显著的负相关关系( $P<0.01$ ),但与比叶面积呈极显著的正相关关系( $P<0.01$ )。本研究有助于从植物生理学的角度上准确认识典型草原植物的水分适应性及水分生态特征。

**关键词:**黎明水势;午后水势;叶片性状;根系深度;植物功能型

## The adaptability of plants to water based on leaf water potential in typical steppe in Inner Mongolia

HOU Dongjie<sup>1,2</sup>, LIU Changcheng<sup>1</sup>, QIAO Xianguo<sup>1,2</sup>, LU Shuaizhi<sup>1,2</sup>, GUO, Ke<sup>1,2,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environment Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

**Abstract:** Water is the most important eco-factor which strongly constrains the survival, reproduction, and dispersal of plants in typical steppes. Plants can adapt to arid environments through various water strategies. To elucidate the characteristics of leaf water potential and its relationships with the functional traits of leaves and roots in the typical steppes in Inner Mongolia, we measured the predawn water potential, midday water potential, and functional traits of leaves and roots in 71 plant species during the growing seasons in 2017 and 2018. We had the following key results. The predawn and midday water potential of all the 71 species ranged from -2.67 to 0.63 Mpa and from -4.67 to -1.01 Mpa, respectively. Among five plant functional groups, the annual plants had the highest predawn and midday water potential, and the smallest diurnal range of water potential (i.e. the difference between predawn water potential and midday water potential); the perennial grasses followed the opposite patterns. The water-adaptive strategies of 71 plant species were quantitatively classified into three types: high water potential type, low water potential type, and fluctuant water potential type. Across 71 plant species, their midday water potentials exhibited significantly negative correlations with their leaf dry matter content and root depths ( $P<0.01$ ), and significantly positive correlations with their specific leaf area ( $P<0.01$ ). Our findings might help us to understand the water adaptability and water ecological characteristics of plant species in the typical steppes

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(2014CB138802);国家科技支撑计划(2015BAC02B05)

**收稿日期:**2019-03-19; **网络出版日期:**2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoke@ibcas.ac.cn

in Inner Mongolia from the perspective of plant physiology.

**Key Words:** predawn water potential; midday water potential; leaf functional trait; root depth; plant functional group

草原生态系统主要分布在我国干旱和半干旱地区,是我国重要的陆地生态系统类型之一,其面积约占国土面积的 40%,具有重要的经济价值和生态服务功能<sup>[1-2]</sup>。水分是影响草原生态系统结构与功能最重要的生态因子<sup>[3]</sup>。与荒漠生态系统和森林生态系统相比,草原生态系统的降水具有更强烈的季节分配不均和年际变化,不均匀的降水分配常常导致植物受到干旱胁迫<sup>[4]</sup>。与环境中强光照辐射、低温等其它胁迫相比,干旱胁迫对草原生态系统植物的生长和繁殖具有更严重的威胁。干旱胁迫增加植物个体的死亡率,影响种群繁殖,改变植物种间关系,进而对草原群落结构和功能及生态系统稳定性产生影响<sup>[5-8]</sup>。与干旱环境协同进化的过程中,草原生态系统中的植物采取多样的水分适应策略适应干旱环境<sup>[9]</sup>。然而,受到气候变化剧烈的影响,草原生态系统的气温持续升高,降水减少,极端高温和降水事件发生的强度与频率明显升高<sup>[10-13]</sup>,这也进一步加剧草原生态系统植物所受到的干旱胁迫。

植物水势是定量描述植物体内水分状况的指标,可表征植物从土壤中获取水分的能力,也是指示植物耐旱能力的一个重要生理指标<sup>[9, 14-15]</sup>。植物通常在午后具有最低的水势,表征植物在一天内受到最严重的水分胁迫,也是表征其耐旱能力的指标之一<sup>[15]</sup>。黎明水势通常指示植物一天内最高的水势,是衡量植物水分恢复能力的重要指标<sup>[15]</sup>。植物水势在物种耐旱性比较中得到了很好的应用<sup>[9, 14, 16]</sup>,并成为评价植物对水分胁迫响应最常用的生理指标之一<sup>[17]</sup>。目前较多的研究集中在单个或少数植物物种的水势日动态变化特征<sup>[18-20]</sup>、植物水势与气温、土壤水分等环境因子的关系<sup>[21-22]</sup>及不同植物物种的水势特征比较等方面<sup>[23-24]</sup>,而对于区域内多物种、多层次的植物水势关系研究较为匮乏。从研究区域上看,受水分严重胁迫的荒漠生态系统常常被学者所关注<sup>[20-21]</sup>,但受降水季节分配不均及年际降水变化大的草原生态系统却常常被忽视,当前仅有少数的研究<sup>[18, 25]</sup>。也有学者从叶片中脉性状、叶脉密度的角度上研究植物水势与叶片功能性状的关系<sup>[26-27]</sup>。在土壤—植物—大气连续体(Soil—Plant—Atmosphere Continuum)中,植物根、茎和叶片与水分的吸收、运输和散失均有密切关系,这些器官的功能性状对植物水势有怎样的影响,目前缺乏系统的研究。此外,植物水势也被作为定量化的水分指标应用在农业水分管理中<sup>[28-29]</sup>。

内蒙古典型草原是我国北方草原的典型代表,具有多种不同的群落类型,如大针茅(*Stipa grandis*)群落、克氏针茅(*S. krylovii*)群落、羊草(*Leymus chinensis*)群落等。该区域的降水具有强烈的季节性波动和年际变化,同时也是受到气候变化严重影响的区域之一<sup>[4]</sup>。因此,植物在生长与繁殖过程中常常受到干旱胁迫。内蒙古典型草原植物通过在叶片上形成特殊的结构和独特的生理代谢机制等途径来减少水分散失并适应干旱环境。此外,不同植物的根系类型和分布深度也可以使植物利用不同深度及来源的土壤水分,缓解水分竞争压力<sup>[30]</sup>。然而,内蒙古典型草原不同植物具有怎样的水分适应性及适应策略,目前的研究较为欠缺。因此,本文以内蒙古典型草原植物水势及其根系和叶片功能性状为基础探讨:(1)不同物种及功能型植物具有怎样的水势特征及耐旱策略?(2)植物根系和叶片功能性状对植物水势具有怎样的影响?

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

在内蒙古中部的典型草原分别选择围封的赖草(*L. secalinus*)草原、长芒草(*S. bungeana*)草原、大针茅(*S. grandis*)草原、克氏针茅(*S. krylovii*)草原和羊草(*L. chinensis*)草原作为实验群落。赖草草原和长芒草草原分别位于呼和浩特市东北部和东南部;大针茅草原设立在锡林浩特市白音锡勒牧场;克氏针茅草原和羊草草原位于锡林浩特市毛登牧场。5种群落的气候类型均为温带大陆性季风气候(夏季高温多雨,冬季寒冷干燥),60%—80%的降水量集中在生长季,年蒸发量远超过年降水量。各实验群落在7、8月具有相似的气温和降水

量(表 1),其中各群落的气温与降水量是通过其 30 年气温和降水数据插值计算得到的。

赖草草原的建群种为赖草,其它常见物种多为一年生植物,主要包括:藜(*Chenopodium album*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、黄蒿(*A. scoparia*)、黄花蒿(*A. annua*)等。长芒草草原的建群种为长芒草,其它物种包括糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)等;大针茅草原的物种包括:大针茅、羊草、糙隐子草、冰草(*Agropyron cristatum*)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、野韭(*Allium ramosum*)、细叶葱(*A. tenuissimum*)等;克氏针茅草原的物种组成分别为克氏针茅、羊草、糙隐子草、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosum*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、乳白花黄芪(*A. galactites*)等;羊草草原中羊草占有绝对优势,其它伴生种包括糙隐子草、兴安虫实(*Corispermum chinganicum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、刺藜(*Chenopodium aristatum*)等。5 种群落共包含 71 种植物,可代表内蒙古典典型草原中的常见物种。

表 1 研究样点地理位置与气候条件

Table 1 Location and climate data at the five sampling sites

群落类型 Community types	地理位置 Location	海拔 Altitude/m	年均气温 Mean annual temperature/°C	年均降水量 Mean annual precipitation/mm	7、8 月平均温度 Mean temperature in Jul. and Aug./°C	7、8 月平均降水量 Mean precipitation in Jul. and Aug./mm
赖草草原 <i>L. secalinus</i> steppe	111°53'20"E 40°54'15"N	1132	5.9	363.7	21.8	92.5
长芒草草原 <i>S. bungeana</i> steppe	111°50'50"E 40°21'03"N	1252	5.9	394.5	21.7	101.2
大针茅草原 <i>S. grandis</i> steppe	116°40'12"E 43°33'37"N	1244	-0.2	355.6	18.6	99.7
克氏针茅草原 <i>S. krylovii</i> steppe	116°29'00"E	1100	1.4	300.4	20.2	89.8
羊草草原 <i>L. chinensis</i> steppe	44°09'50"N					

## 1.2 样品采集

实验分别于 2017 年和 2018 年的 7、8 月进行,其中叶片黎明水势样品在 4:00—5:00 采集(当地日出时间约为 4:30—5:30),叶片午后水势样品在 14:00—15:00 进行采集(植物水势日最低值时段),实验期间对每个群落进行 10 次水势测定。所有样品的采集均在前 3 日无降水事件发生的天气中进行。在各群落中选择地形开阔、平坦的位置作为取样小区(3 m × 3 m),随后对小区中的所有物种进行采集。生活型为草本的个体,每个物种随机选择 3 株健康、成熟的个体,随后混合作为 1 个样品;生活型为灌木与半灌木的个体,从植株体中部选择 3 个健康的枝条进行混合作为 1 个样品。每个物种进行 3—5 次重复。将采集到的样品迅速装入黑色自封袋内并放入 4°C 的保温箱中,随后立即带回实验室(路程约 600—800 m)进行水势的测定。对于不能及时测定的物种,暂时将其放置于样品杯中密封保存。依照 WP4-T 露点水势仪说明书介绍,植物样品置于样品杯中的最长有效保存时间为 3 小时。

2018 年 8 月,对已测定水势的各物种叶片和根系分布进行采集并测定其功能性状。在各物种所在的群落中,随机选择各物种健康、成熟和完整的植株,通过挖取法测量植物根系深度,每个物种进行 3 次重复。将采集的叶片装入自封袋中并放入 4°C 的保温箱内,带回实验室测定,每个物种设置 10 次重复。

## 1.3 样品测定

使用 WP4-T 露点水势仪(Decagon Devices, USA)对植物叶片水势进行测定。在样品测定前,先使用 0.5 mol/L 的 KCl 溶液对 WP4-T 露点水势仪进行校准。叶片类型为单叶的物种,选择其单叶进行测定;叶片类型为复叶的物种,选择其复叶中部的成熟小叶进行测定。首先,避开叶脉将植物叶片剪成长度约为 2 cm 的小段并铺满样品杯(直径 4 cm,高度 1 cm)底部,随后将样品杯放入露点水势仪中并进行水势测定,待露点水势仪

读数稳定并发出提示音后,记录该物种的水势值。每次水势测量时间少于 2 小时。

对于叶片功能性状的测定,叶片类型为单叶的物种,选择其单叶进行测量;叶片类型为复叶的物种,采集其复叶中部的小叶进行测量。使用电子天平(分辨率为 0.001 g)对植物叶片鲜重进行称量。随后,利用直尺对叶片长度和叶片宽度进行测量,其中叶片宽度以叶片中部附近 3 次测量的平均值表示。再利用扫描仪对叶片进行扫描并利用 Image J 软件计算其叶面积。最后将叶片样品装入信封并置于 65℃ 的烘箱内烘干 48 h 后,称量干重。

#### 1.4 数据处理

植物水分适应性使用叶片黎明水势、午后水势和水势日差值表示,其中水势日差值为植物叶片黎明水势与午后水势的差值,计算公式如下:

$$\text{水势日差值} = \text{黎明水势} - \text{午后水势}$$

先依照植物生活型,再依照植物子叶类型对植物功能型进行划分。71 种植物可划分为 5 种植物功能型,分别为一年生草本、单子叶杂类草、双子叶杂类草、多年生禾草和灌木与半灌木。

利用聚类分析法对植物的水分适应性进行定量分类。首先选取各植物叶片的黎明平均水势、午后平均水势、平均水势日差值、午后水势中的最低值和黎明水势中的最高值作为聚类指标。其中,叶片午后水势中的最低值和黎明水势中的最高值分别表示植物可以忍受的最大水分胁迫和最高水分恢复能力。然后对各指标进行异常值和正态分布检验,本研究中所有数据无异常值并均符合正态分布,再以各指标构造矩阵进行聚类分析。

叶片功能性状使用叶片长度、叶片宽度、叶片长宽比、叶片干物质含量和叶片比叶面积表示,其中叶片长宽比、叶片干物质含量和叶片比叶面积使用以下公式计算:

$$\text{叶片长宽比} = \text{叶片长度} / \text{叶片宽度}$$

$$\text{叶片干物质含量} = (\text{叶片干重} / \text{叶片鲜重}) \times 100\%$$

$$\text{比叶面积} = \text{叶片面积} / \text{叶片干重}$$

根系功能性状使用植物根系分布深度表示,部分植物根系数据采用《中国北方草地植物根系》<sup>[31]</sup>中植物根系深度表示,若植物根系深度数据描述为范围时,则采用该植物根系分布深度范围的中值表示。71 种植物可分为两种根系类型,直根型植物和须根型植物。

利用单因素方差分析比较不同功能型植物叶片的水势、水势日差值及根系和叶片功能性状的差异,其中多重比较的方法选择 Turkey 法。利用聚类分析法对植物水分适应性进行定量分类,聚类方法选择 Ward 法,各类别间的距离计算方法选择欧氏距离。植物叶片和根系性状特征与叶片午后水势的定量关系使用一元线性回归法检验。数据的统计检验在 IBM SPSS 21.0 和 R 3.4.3 中进行。

## 2 研究结果

### 2.1 不同植物物种的水势特征

内蒙古典型草原 71 种植物叶片的黎明水势分布于 -2.67—-0.63 Mpa,其中 63.4% 的叶片黎明水势集中于 -2—-1 Mpa 中(图 1a)。叶片午后水势分布于 -4.67—-1.01 Mpa,其中有 31.0%、36.6% 和 29.6% 的叶片午后水势分别分布于 -2—-1 Mpa、-3—-2 Mpa 和 -4—-3 Mpa(图 1b)。这表明叶片黎明水势和午后水势的分布分别具有相对集中性和分散性。矮葱(*A. anisopodium*)叶片具有最高的黎明水势和午后水势,分别为 -0.63 Mpa 和 -1.01 Mpa(附表 1);克氏针茅的叶片具有最低的黎明水势和午后水势,为 -2.67 Mpa 和 -4.67 Mpa(附表 1)。

### 2.2 不同功能型植物的水势特征

一年生植物的叶片具有最高的黎明水势和午后水势,显著高于双子叶杂类草、多年生禾草和灌木与半灌木的(图 2a 和 2b;  $P < 0.05$ )。多年生禾草的具有最低的黎明水势和午后水势(图 2a 和 2b)。单子叶杂类草与

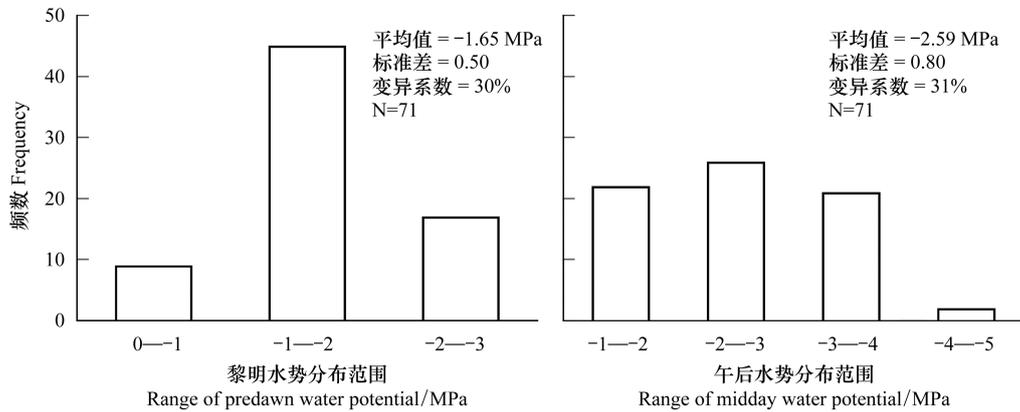


图1 典型草原 71 种植物的水势分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of leaf water potential in 71 species in typical steppe

一年生植物的叶片具有相似的黎明水势和午后水势,多年生禾草和灌木与半灌木的也具有相似的叶片黎明水势和午后水势(图 2a 和 2b)。一年生植物和单子叶杂类草的叶片具有较小的水势日差值并显著低于多年生禾草和灌木与半灌木的(图 2c;  $P < 0.05$ )。

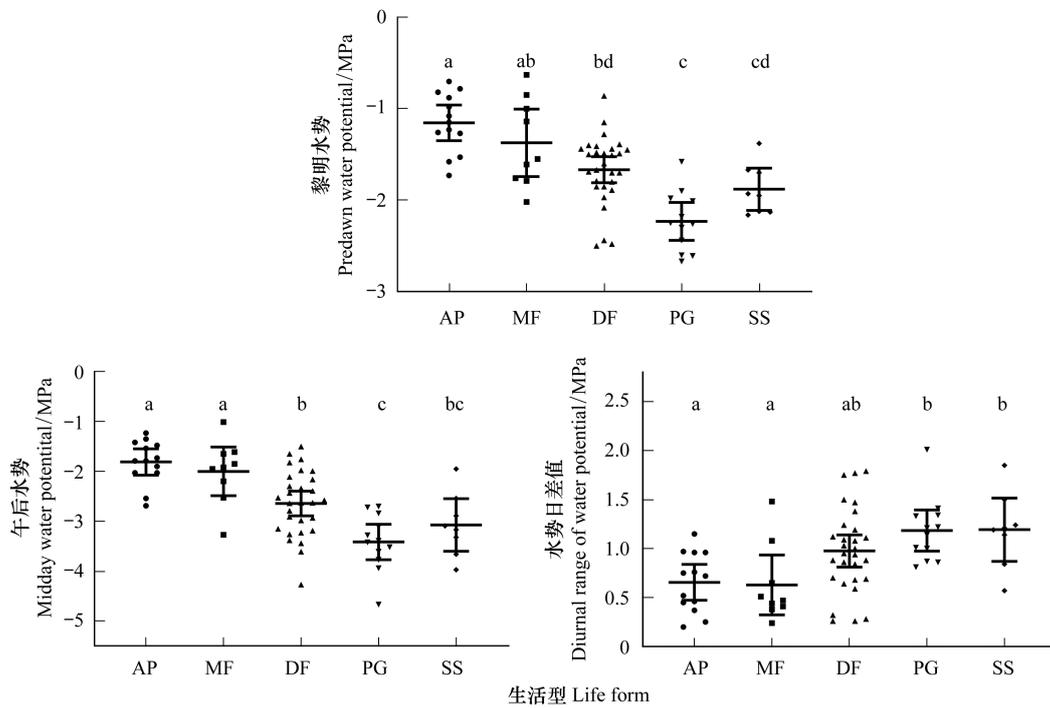


图2 不同功能型植物的水势特征

Fig.2 Characteristics of water potential in different plant functional groups

AP (Annual plants): 一年生植物; MF (Monocotylous forbs): 单子叶杂类草; DF (Monocotyledonous forbs): 双子叶杂类草; PG (Perennial grasses): 多年生禾草; SS (Shrub and subshrubs): 灌木与半灌木; 数据表示方式为平均值  $\pm$  95% 置信区间; 不同小写字母表示在 0.05 水平上不同功能型植物间的水势和水势日差值存在显著差异

### 2.3 植物水分适应性的定量分类

以植物叶片的黎明平均水势、午后平均水势、平均水势日差值、黎明水势中的最高值和午后水势中的最低值为定量指标进行聚类分析。71 种植物可以被划分为 3 个类群(A—C); 类群 A (35—38) 包含的植物通常具

有较低的叶片黎明水势、午后水势和较大的水势日差值,例如长芒草、冰草、糙隐子草、大针茅、克氏针茅等 9 种植物(图 3)。类群 B(39—64) 包含菊叶委陵菜、防风(*Saposhnikovia divaricata*)、伏毛山莓草(*Sibbaldia adpressa*)、旱麦瓶草(*Silene jenisseensis*)等 33 种植物(图 3),这些植物叶片的黎明水势、午后水势和水势日差值通常具有较大的波动性;类群 C(11—52) 包含香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、斜茎黄芪(*Astragalus adsurgens*)、猪毛菜、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、长柱沙参(*Adenophora stenanthina*)等 29 种植物,这类植物通常具有较高的叶片黎明水势、午后水势和较小的水势日差值(图 3)。

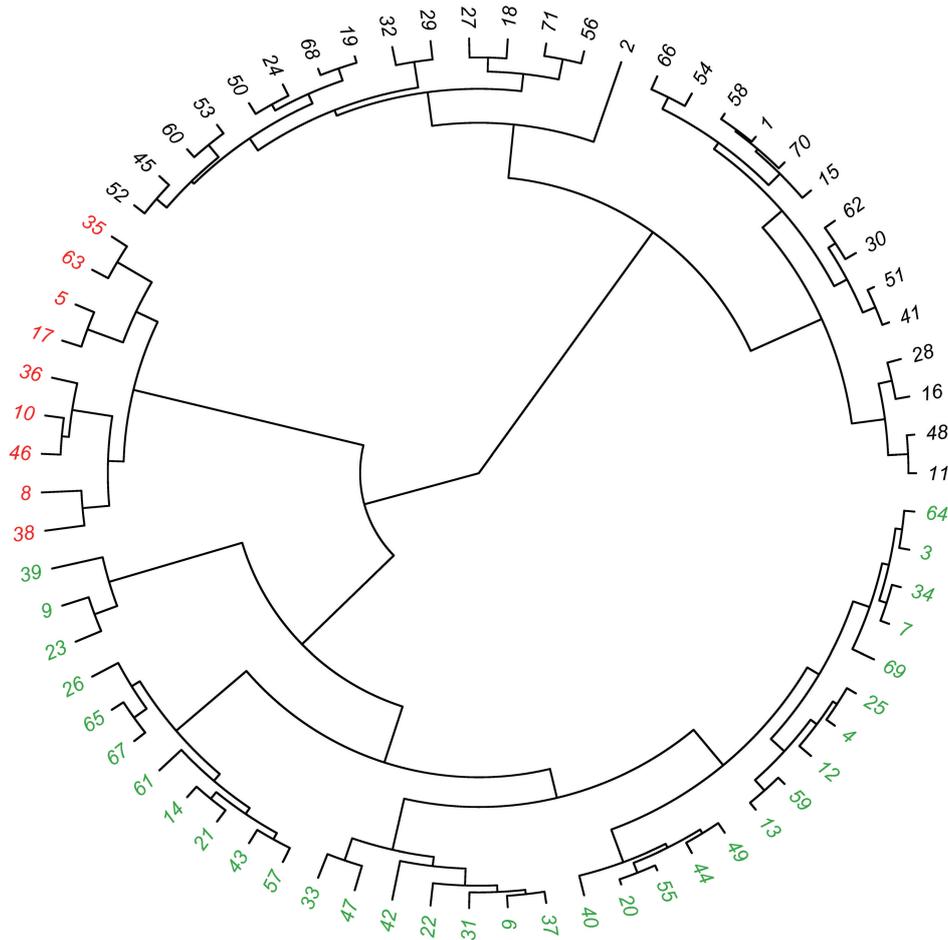


图 3 基于水势特征的 71 种植物的树状图

Fig.3 Dendrogram of 71 plant species based on water potential

红色数字表示类群 A;绿色数字表示类群 B;黑色数字表示类群 C;物种名称由各植物所在附表 1 中的代码表示

#### 2.4 植物水势与根系和叶片性状特征的关系

叶片午后水势与其叶片长度、叶片宽度和叶片长宽比无显著的相关关系(图 4a,4b 和 4c; $P>0.05$ )。叶片午后水势与叶片干物质含量呈极显著的负相关(图 4d; $P<0.0001$ ),而与叶片比叶面积呈极显著的正相关关系(图 4e; $P<0.0001$ )。

叶片午后水势与植物的根系分布深度呈极显著的负相关关系(图 5a; $P<0.01$ ),其中在直根型植物中,这种关系更加显著(图 5b; $P<0.0001$ )。

#### 3 讨论

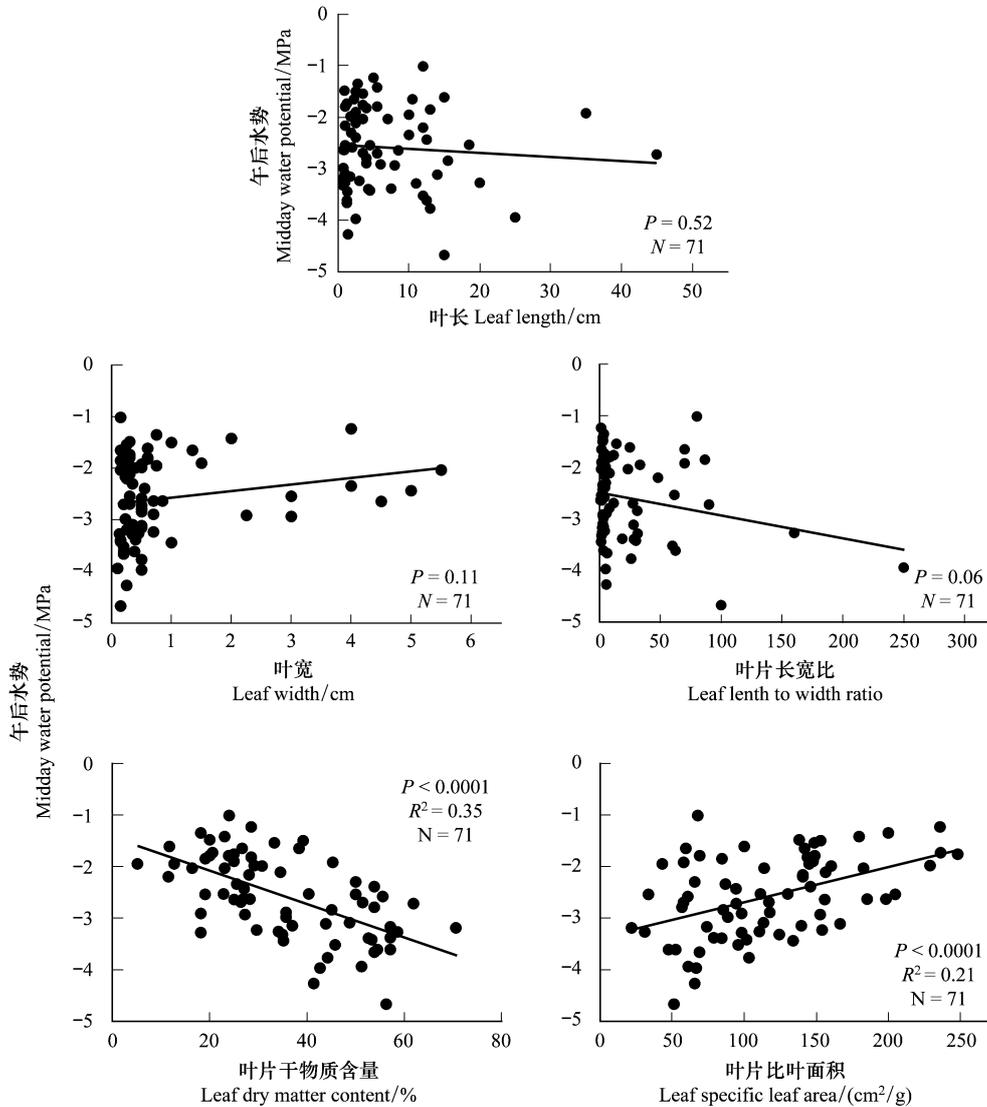


图 4 叶片性状特征与午后水势的关系

Fig.4 Relationship between midday water potential and leaf functional traits

### 3.1 典型草原植物的水势特征及适应策略

本研究测定的 71 种植物叶片的水势具有广泛的分布范围和物种特异性(附表 1),反映了内蒙古典草原中的植物具有多样的水分适应策略。这些植物叶片的黎明水势的分布具有相对集中性,午后水势的分布则具有相对分散性(图 1)。叶片黎明水势的相对集中性主要由于这些植物生长在相似的生境中,不同植物体内的水分在夜晚都得到了有效的补充,并与土壤水势达到相对平衡<sup>[32]</sup>。叶片午后水势的相对分散则是由于植物具有不同的水分适应策略。

多年生禾草和灌木与半灌木的叶片具有较低的黎明水势、午后水势和较大的水势日差值,一年生植物的叶片具有较高的叶片黎明水势、午后水势和较小的日差值(图 2),与前人对位于典型草原地带中的浑善达克沙地的研究结果一致<sup>[9]</sup>。这表明该区域内的典型草原和沙地的植物具有相似的水分适应策略。一年生植物叶片中的水分含量高达 77.1%,显著高于双子叶杂类草(62.6%)、多年生禾草(51.8%)和灌木与半灌木(59.0%)的(表 2)。叶片中较高的含水量有利于植物保持较高的水势。一年生植物的比叶面积(163.2 cm<sup>2</sup>/g)也远高于多年生禾草和灌木与半灌木(87.3 cm<sup>2</sup>/g 和 92.9cm<sup>2</sup>/g)的,也表明它们更加适合相对湿润的环境。此

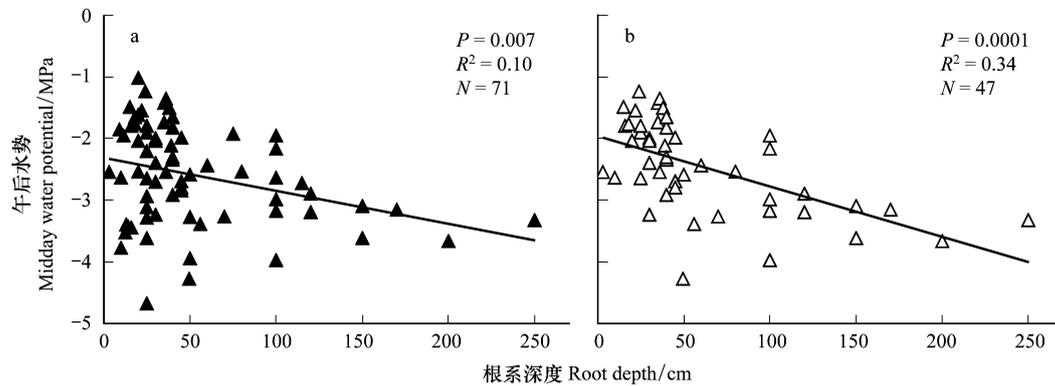


图5 根系深度与午后水势的关系

Fig.5 Relationship between midday water potential and root depth

外,一年生植物多数属于避旱型的水分适应策略,它们通常利用夏季短暂而充沛的降水快速完成生活史,此阶段相对湿润的环境也使其具有相对较高的水势,多年生禾草和灌木与半灌木常常受到干旱胁迫并需要长期适应这种干旱环境,它们可以通过较强的渗透调节系统使其在低水势下维持正常的生理代谢活动<sup>[33]</sup>。多年生禾草和灌木与半灌木较低的水势,表明其具有较强的耐旱性。这也可以从水分的角度佐证多年生禾草和灌木与半灌木在草原生态系统中占有优势地位的原因。在未来随着草原生态系统干旱事件的频度与强度的增加,草原生态系统中多年生禾草和灌木与半灌木的数量可能进一步增加。

表2 不同功能型植物根系和叶片功能性状

Table 2 Functional traits of root and leaf among different plant functional groups

植物功能型 Plant functional groups	根系深度 Root depth/cm	叶片含水量 Leaf water content/%	比叶面积 Specific leaf area / (cm <sup>2</sup> /g)
一年生草本 Annual plants	25.5±3.0 <sup>c</sup>	77.1±1.3 <sup>a</sup>	163.2±13.6 <sup>a</sup>
单子叶杂类草 Monocotyledonous forbs	27.6±7.1 <sup>c</sup>	74.1±5.4 <sup>a</sup>	79.4±12.6 <sup>c</sup>
双子叶杂类草 Dicotyledonous forbs	57.1±7.3 <sup>b</sup>	62.6±2.4 <sup>b</sup>	125.1±10.0 <sup>b</sup>
多年生禾草 Perennial grasses	32.5±8.3 <sup>c</sup>	51.8±3.1 <sup>c</sup>	87.3±9.3 <sup>c</sup>
灌木与半灌木 Shrub and subshrubs	132.0±23.6 <sup>a</sup>	59.0±5.9 <sup>b</sup>	92.9±13.3 <sup>bc</sup>

不同小写字母表示在 0.05 水平上不同功能型植物的根系和叶片性状具有显著差异

基于植物水势特征,内蒙古典型草原 71 种植物可划分为 3 种水分适应策略(低水势忍耐型、高水势保持型和变水势波动型)。本研究划分的低水势忍耐型、高水势保持型与李吉跃提出的“低水势忍耐脱水”和“高水势延迟脱水”机制一致<sup>[34]</sup>。低水势忍耐型的植物通常具有较低的叶片黎明水势、午后水势和较大的水势日差值,这些植物通过保持膨压和原生质耐脱水等方式在低水势状态下依旧可以保持正常的生理代谢能力<sup>[34]</sup>。本研究中大多数多年生禾草和部分灌木与半灌木属于该类型,这也与其具有较强的耐旱性一致。高水势保持型的植物具有较高的叶片黎明水势、午后水势和较小的水势日差值,这些植物具有保持水分吸收或减少水分散失的结构,使植物保持高水势状态<sup>[34]</sup>。本研究中大部分一年生植物和单子叶杂类草属于这种类型。此外,部分植物的叶片黎明水势、午后水势和水势日差值具有较大的波动性,这种波动介于高水势保持型和低水势忍耐型之间,这类植物的水分适应策略可能属于变水势波动型。水势的波动源于植物生理代谢活动中,根系对水分的吸收和叶片水分的散失,这可能也是典型草原中大多数植物对水分的适应策略,本研究中大部分双子叶杂类草属于该类型。

### 3.2 根系和叶片性状特征对植物水势的影响

植物叶片性状与蒸腾作用和水分利用效率等过程有密切的联系<sup>[26]</sup>。本研究发现植物水势与叶片长度和

宽度无显著关系(图 4a 和 4b;  $P>0.05$ )。这可能由于典型草原植物为适应干旱的环境,叶片长度和叶片宽度分别采取缩短和变窄的趋同适应方式,其中在叶片宽度上更为明显,本研究中大多数植物的叶片宽度不足 1 cm(图 4b)。此外,多年生禾草在水分亏缺时,叶片还会发生内卷以减少叶片宽度,从而降低水分的散失。叶片干物质含量与植物叶片水势具有极显著的负相关关系(图 4d;  $P<0.01$ ),叶片中部分干物质具有渗透调节作用<sup>[16, 23]</sup>,较高的叶片干物质含量有利于植物在低水势的状况下,保持正常的生理活动,提高植物的耐旱性<sup>[23]</sup>。此外,比叶面积与植物叶片水势具有极显著的正相关关系(图 4e;  $P<0.01$ )。较低的比叶面积被认为是植物长期适应干旱环境的一种策略,植物将更多的能量与物质投入到构建保卫结构、叶肉细胞密度和叶片厚度等结构并增加水分运输的阻力<sup>[35-36]</sup>,以抵御干旱环境。

植物根系深度与植物叶片水势具有极显著的负相关关系(图 5;  $P<0.01$ ),这与前人的研究结果一致<sup>[9]</sup>。较深的根系分布有利于植物获取深层土壤水分,提高植物的耐旱性,同时具有较低水势也更有利于植物从土壤中吸收水分。此外,与须根型植物(主要为多年生禾草和单子叶杂类草)相比,直根型植物(主要为双子叶杂类草、灌木与半灌木和一年生草本)的根系深度与植物叶片水势具有极显著的负相关关系(图 5b;  $P<0.0001$ )。这可能由于直根型植物的根系分布更深,尤其是灌木与半灌木的(132.0 cm)。此外,须根型植物具有更大的根系分布面积,这也有利于它们扩大根系对水分的吸收面积。

#### 4 结论

内蒙古典典型草原由多种不同功能型的植物组成,与干旱环境协同进化的过程中,这些植物对干旱胁迫具有不同的适应能力和策略。内蒙古典典型草原植物的水势具有广泛的分布范围和物种特异性,表明植物对干旱环境的适应具有多样化的策略。一年生植物具有较高的叶片黎明水势、午后水势及较小的水势日差值,表明其具有较弱的耐旱性。多年生禾草和灌木与半灌木具有较低的叶片黎明水势、午后水势和较大的水势日差值,表明其具有较强的耐旱性,这也是多年生禾草和灌木与半灌木成为草原生态系统中建群种或重要伴生种的一个重要原因。典型草原植物对水分适应策略可分为低水势忍耐型、高水势保持型和变水势波动型。叶片形态特征(叶片长度和叶片宽度)对植物水势无显著影响,但具有功能作用的叶片性状(干物质含量和比叶面积)和根系深度对植物叶片水势具有显著影响。内蒙古典典型草原生态系统植物对水分适应策略的多样化也有助于维持草原生态系统的稳定性。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Kang L, Han X G, Zhang Z B, Sun J X O. Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement. *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [ 2 ] Han X G, Owens K, Wu X B, Wu J G, Huang J H. The grasslands of inner mongolia; a special feature. *Rangeland Ecology & Management*, 2009, 62(4): 303-304.
- [ 3 ] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184.
- [ 4 ] 陈敏玲, 张兵伟, 任婷婷, 王姗姗, 陈世苹. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(7): 658-668.
- [ 5 ] Jägerbrand A K, Alatalo J M, Chrimes D, Molau U. Plant community responses to 5 years of simulated climate change in meadow and heath ecosystems at a subarctic-alpine site. *Oecologia*, 2009, 161(3): 601-610.
- [ 6 ] Prieto P, Peñuelas J, Lloret F, Llorens L, Estiarte M. Experimental drought and warming decrease diversity and slow down post-fire succession in a Mediterranean shrubland. *Ecography*, 2009, 32(4): 623-636.
- [ 7 ] Walker M D, Wahren C H, Hollister R D, Henry G H R, Ahlquist L E, Alatalo J M, Bret-Harte M S, Calef M P, Callaghan T V, Carroll A B, Epstein H E, Jónsdóttir I S, Klein J A, Magnússon B, Molau U, Oberbauer S F, Rewa S P, Robinson C H, Shaver G R, Suding K N, Thompson C C, Tolvanen A, Totland Ø, Turner P L, Tweedie C E, Webber P J, Wookey P A. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(5): 1342-1346.
- [ 8 ] Yang H J, Wu M Y, Liu W X, Zhang Z, Zhang N L, Wan S Q. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 452-465.
- [ 9 ] Liu M Z, Jiang G M, Li Y G, Niu S L, Gao L M, Ding L, Peng Y. Leaf osmotic potentials of 104 plant species in relation to habitats and plant functional types in Hunshandak Sandland, Inner Mongolia, China. *Trees*, 2003, 17(6): 554-560.
- [ 10 ] Cherwin K, Knapp A. Unexpected patterns of sensitivity to drought in three semi-arid grasslands. *Oecologia*, 2012, 169(3): 845-852.

- [11] De Boeck H J, Vicca S, Roy J, Nijs I, Milcu A, Kreyling J, Jentsch A, Chabbi A, Campioli M, Callaghan T, Beierkuhnlein C, Beier C. Global change experiments: challenges and opportunities. *BioScience*, 2015, 65(9): 922-931.
- [12] John R, Chen J Q, Ouyang Z T, Xiao J F, Becker R, Samanta A, Ganguly S, Yuan W P, Batkhishig O. Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 035033.
- [13] Qu L P, Chen J Q, Dong G, Jiang S C, Li L H, Guo J X, Shao C L. Heat waves reduce ecosystem carbon sink strength in a Eurasian meadow steppe. *Environmental Research*, 2016, 144: 39-48.
- [14] Gebrehiwot K, Muys B, Haile M, Mitloehner R. The use of plant water relations to characterize tree species and sites in the drylands of northern Ethiopia. *Journal of Arid Environments*, 2005, 60(4): 581-592.
- [15] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J, Trlica M J. Water status of soil and vegetation in a shortgrass steppe. *Oecologia*, 1981, 48(3): 327-331.
- [16] Liu C C, Liu Y G, Fan D Y, Guo K. Plant drought tolerance assessment for re-vegetation in heterogeneous karst landscapes of southwestern China. *Flora- Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2012, 207(1): 30-38.
- [17] 郭冰寒, 王若水, 肖辉杰. 沙棘苗期叶水势与气孔导度对水分胁迫的响应. *核农学报*, 2018, 32(3): 609-616.
- [18] 宋敏超, 杜广明, 冯朝阳, 朱琳. 呼伦贝尔典型草原四种优势植物水势日变化规律研究. *中国草地学报*, 2012, 34(5): 114-119.
- [19] 杨显基, 杜建会, 秦晶, 陈志华, 杨林, 宋爽. 福建平潭岛海岸不同演化阶段草丛沙堆表面老鼠茅叶水势日变化特征. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3260-3266.
- [20] 韩文军, 春亮, 王育青. 阿拉善荒漠区主要盐生植物水势日变化. *草业科学*, 2011, 28(1): 110-112.
- [21] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 极端干旱区旱生芦苇叶水势变化及其影响因子研究. *草业学报*, 2012, 21(3): 163-170.
- [22] 尹立河, 黄金廷, 王晓勇, 马洪云, 张俊, 董佳秋. 毛乌素沙地 4 种植物叶水势变化及其影响因素分析. *植物资源与环境学报*, 2016, 25(1): 17-23.
- [23] 刘长成, 刘玉国, 郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1070-1082.
- [24] 王丁, 姚健, 杨雪, 薛建辉. 干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化. *生态学报*, 2010, 31(8): 2216-2226.
- [25] 刘玉燕, 王艳荣, 杨迎春. 半干旱地区草坪草和主要杂草水势的日变化特征分析. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2003, 34(3): 308-311.
- [26] 徐婷, 赵成章, 韩玲, 郑慧玲, 冯威, 段贝贝. 张掖湿地旱柳叶水势与中脉性状的关联性. *生态学报*, 2017, 37(10): 3335-3343.
- [27] 姚广前, 魏阳, 毕敏慧, 聂争飞, 方向文. 干旱胁迫下 4 种锦鸡儿属植物叶脉密度与最低水势关系. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1252-1258.
- [28] 桑永青, 马娟娟, 孙西欢, 郭向红, 秦聪, 李波. 蓄水坑灌下不同灌水对新梢旺长期苹果园 SPAC 系统水势影响研究. *节水灌溉*, 2016, (3): 6-10.
- [29] 王克鹏, 张仁陟, 董博, 谢军红. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响. *生态学报*, 2014, 34(13): 3752-3761.
- [30] Yang H, Auerswald K, Bai Y F, Han X G. Complementarity in water sources among dominant species in typical steppe ecosystems of Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*, 2011, 340(1/2): 303-313.
- [31] 陈世鏞. 中国北方草地植物根系. 长春: 吉林大学出版社, 2001.
- [32] Nobel P S. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. San Diego, New York: Academic Press, 1991.
- [33] Morgan J M. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1984, 35: 299-319.
- [34] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理. *北京林业大学学报*, 1991, 13(3): 92-100.
- [35] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, Vose J M, Volin J C, Gresham C, Bowman W D. Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups. *Oecologia*, 1998, 114(4): 471-482.
- [36] 祁建, 马克明, 张育新. 北京东灵山不同坡位辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶属性的比较. *生态学报*, 2008, 28(1): 122-128.

## 附录:

附表 1 内蒙古典型草原 71 种植物叶片水势值 (平均值±标准误)

Table S1 Leaf water potential of 71 species in the typical steppe in Inner Mongolia (means ± SE)

代码 物种 Code Species	植物功能型 Plant functional groups	测量次数 N	黎明水势 Predawn water potential/Mpa	黎明最高水势 Max. predawn water potential/Mpa	午后水势 Midday water potential/Mpa	午后最低水势 Min. predawn water potential/Mpa	水势日差值 Daily range of water potential/Mpa
1 阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	DF	38	-1.40±0.05	-0.9	-1.99±0.09	-3.13	0.59±0.06
2 矮韭 <i>Allium anisopodium</i>	MF	15	-0.63±0.12	-1.07	-1.01±0.02	-1.15	0.38±0.05
3 百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	SS	15	-1.70±0.04	-1.48	-2.54±0.11	-3.05	0.84±0.06
4 瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i>	DF	15	-1.44±0.06	-1.05	-2.63±0.11	-3.08	1.19±0.08
5 长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	PG	39	-2.61±0.12	-1.94	-3.61±0.14	-6.03	1.00±0.12
6 花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i>	DF	61	-1.70±0.06	-0.27	-2.53±0.07	-3.62	0.84±0.06
7 柔毛蒿 <i>Artemisia pubescens</i>	DF	15	-1.80±0.05	-1.49	-2.91±0.04	-3.16	1.11±0.04

续表

代码 物种 Code Species	植物功能型 Plant functional groups	测量次数 N	黎明水势 Predawn water potential/Mpa	黎明最高水势 Max. predawn water potential/Mpa	午后水势 Midday water potential/Mpa	午后最低水势 Min. predawn water potential/Mpa	水势日差值 Daily range of water potential/Mpa
8 冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	PG	57	-2.26±0.15	-1.01	-3.28±0.14	-7.37	1.01±0.12
9 糙叶黄芪 <i>Astragalus scaberrimus</i>	DF	15	-1.49±0.24	1.76	-3.26±0.06	-3.65	1.77±0.13
10 糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	PG	78	-2.01±0.10	-0.54	-3.42±0.13	-5.9	1.41±0.11
11 草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	DF	28	-1.89±0.14	-1.24	-2.16±0.09	-2.73	0.28±0.12
12 串铃草 <i>Phlomis mongolica</i>	DF	15	-1.41±0.11	-0.94	-2.64±0.13	-3.44	1.24±0.12
13 刺藜 <i>Chenopodium aristatum</i>	AP	15	-1.73±0.09	-1.17	-2.69±0.16	-3.58	0.96±0.14
14 寸草苔 <i>Carex duriuscula</i>	PG	28	-2.30±0.05	-1.69	-3.52±0.08	-4.44	1.22±0.05
15 兴安胡枝子 <i>Lespedeza daurica</i>	SS	44	-1.38±0.06	-0.57	-1.95±0.10	-3.02	0.57±0.07
16 达乌里黄芪 <i>Astragalus dahuricus</i>	AP	15	-1.53±0.04	-1.3	-1.73±0.06	-1.98	0.20±0.04
17 大针茅 <i>Stipa grandis</i>	PG	64	-2.60±0.12	-1.72	-3.94±0.12	-6.44	1.34±0.12
18 大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	AP	15	-0.88±0.10	-0.52	-2.03±0.07	-2.43	1.15±0.08
19 地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	AP	15	-1.27±0.05	-0.96	-1.79±0.06	-2.23	0.52±0.05
20 多叶棘豆 <i>Oxytropis myriophylla</i>	DF	15	-1.69±0.06	-1.42	-3.19±0.10	-3.67	1.50±0.07
21 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	DF	66	-2.08±0.06	-1.61	-3.15±0.06	-4.39	1.08±0.06
22 防风 <i>Saposhnikovia divaricata</i>	DF	21	-1.48±0.18	-0.17	-2.43±0.10	-3.14	0.94±0.13
23 伏毛山莓草 <i>Sibbaldia adpressa</i>	DF	15	-1.85±0.20	1.3	-3.61±0.14	-4.26	1.75±0.16
24 甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	DF	47	-1.39±0.08	-0.52	-1.65±0.07	-2.31	0.26±0.07
25 旱麦瓶草 <i>Silene jennisensis</i>	DF	15	-1.67±0.05	-1.23	-2.79±0.04	-3.11	1.12±0.04
26 红柴胡 <i>Bupleurum scorzoniferolium</i>	DF	15	-2.50±0.04	-2.24	-3.38±0.06	-3.9	0.88±0.04
27 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	AP	49	-1.15±0.07	-0.37	-1.90±0.08	-2.79	0.75±0.08
28 黄花葱 <i>Allium condensatum</i>	MF	15	-1.55±0.04	-1.27	-1.95±0.05	-2.32	0.41±0.04
29 黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	AP	15	-0.78±0.03	-0.57	-1.23±0.05	-1.46	0.45±0.03
30 黄花铁线莲 <i>Clematis intricata</i>	DF	13	-1.70±0.08	-1.13	-2.39±0.23	-3.01	0.69±0.12
31 芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	PG	16	-1.58±0.25	-0.19	-2.72±0.35	-3.92	1.14±0.26
32 角茴香 <i>Hypecoum erectum</i>	AP	15	-0.70±0.08	-0.11	-1.42±0.05	-1.68	0.72±0.05
33 菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	DF	69	-1.85±0.07	-0.47	-3.23±0.06	-4.37	1.38±0.06
34 卷叶唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i> var. <i>supradecompositum</i>	DF	15	-1.97±0.10	-1.63	-2.93±0.05	-3.3	0.95±0.07
35 克氏针茅 <i>Stipa krylovii</i>	PG	21	-2.67±0.32	-1.07	-4.67±0.18	-5.71	2.01±0.21
36 赖草 <i>Leymus secalinus</i>	PG	47	-1.98±0.11	-0.72	-2.84±0.13	-5.95	0.87±0.12
37 狼毒大戟 <i>Euphorbia fischeriana</i>	DF	15	-1.49±0.12	-0.43	-2.58±0.23	-3.53	1.09±0.14
38 冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	SS	26	-2.12±0.16	-0.31	-3.97±0.36	-7.35	1.85±0.22
39 藜 <i>Chenopodium album</i>	AP	64	-1.58±0.08	1.04	-2.54±0.10	-4.67	0.97±0.09
40 耧斗菜叶绣线菊 <i>Spiraea aquilegifolia</i>	SS	18	-1.95±0.07	-1.03	-3.09±0.09	-3.81	1.14±0.08
41 麻花头 <i>Serratula centauroides</i>	DF	21	-1.45±0.08	-0.94	-2.34±0.13	-3.08	0.88±0.09
42 马蔺 <i>Iris lactea</i> var. <i>chinensis</i>	MF	15	-0.85±0.05	-0.63	-1.92±0.14	-3.57	1.08±0.08
43 木地肤 <i>Kochia prostrata</i>	SS	15	-2.16±0.07	-1.63	-3.66±0.08	-3.97	1.50±0.08
44 拧条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>	SS	15	-1.93±0.09	-1.52	-3.17±0.08	-3.62	1.24±0.08
45 女娄菜 <i>Silene aprica</i>	AP	15	-0.82±0.08	-0.53	-1.79±0.05	-1.96	0.96±0.06
46 洽草 <i>Koeleria cristata</i>	PG	15	-2.18±0.35	-0.94	-3.39±0.36	-6.29	1.21±0.35
47 乳白黄芪 <i>Astragalus galactites</i>	DF	13	-1.51±0.11	-0.49	-2.98±0.11	-3.65	1.47±0.11
48 乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	DF	15	-1.79±0.11	-1.36	-2.11±0.07	-2.54	0.32±0.08

续表

代码 物种 Code Species	植物功能型 Plant functional groups	测量次数 N	黎明水势 Predawn water potential/Mpa	黎明最高水势 Max. predawn water potential/Mpa	午后水势 Midday water potential/Mpa	午后最低水势 Min. predawn water potential/Mpa	水势日差值 Daily range of water potential/Mpa
49 沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	SS	15	-1.67±0.03	-1.52	-2.89±0.17	-3.65	1.21±0.07
50 山韭 <i>Allium senescens</i>	MF	33	-1.14±0.05	-0.76	-1.61±0.06	-2.39	0.47±0.05
51 米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	DF	15	-1.44±0.09	-0.96	-2.30±0.10	-2.85	0.86±0.09
52 砂韭 <i>Allium bidentatum</i>	MF	15	-1.00±0.05	-0.72	-1.65±0.04	-2.01	0.65±0.04
53 雾冰藜 <i>Bassia dasphylla</i>	AP	25	-1.23±0.12	-0.61	-1.48±0.03	-1.73	0.25±0.06
54 细叶韭 <i>Allium tenuissimum</i>	MF	28	-1.61±0.11	-0.63	-1.85±0.11	-2.89	0.24±0.11
55 细叶鸢尾 <i>Iris tenuifolia</i>	MF	15	-1.79±0.06	-1.36	-3.27±0.07	-3.78	1.48±0.06
56 香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	AP	28	-0.98±0.08	-0.12	-1.35±0.09	-2.56	0.37±0.08
57 小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	SS	15	-2.13±0.04	-1.85	-3.32±0.22	-3.94	1.19±0.13
58 斜茎黄芪 <i>Astragalus adsurgens</i>	DF	18	-1.28±0.04	-0.84	-1.98±0.14	-3.01	0.70±0.09
59 星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i>	DF	15	-1.60±0.04	-1.42	-2.63±0.15	-3.57	1.03±0.09
60 兴安虫实 <i>Corispermum chinganicum</i>	AP	15	-1.08±0.06	-0.85	-1.54±0.04	-1.73	0.46±0.05
61 羊草 <i>Leymus chinensis</i>	PG	77	-2.44±0.08	-1.62	-3.77±0.07	-4.81	1.33±0.07
62 野韭 <i>Allium ramosum</i>	MF	18	-1.76±0.09	-1.14	-2.20±0.15	-3.25	0.44±0.12
63 银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	DF	21	-2.48±0.25	-0.95	-4.27±0.22	-6.01	1.79±0.21
64 硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>	PG	26	-1.90±0.04	-1.43	-2.70±0.08	-3.26	0.81±0.06
65 羽茅 <i>Achnatherum sibiricum</i>	PG	18	-2.25±0.22	-1.35	-3.11±0.11	-3.69	0.86±0.16
66 远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	DF	25	-1.50±0.05	-1.08	-1.76±0.21	-2.84	0.26±0.17
67 展枝唐松草 <i>Thalictrum squarrosom</i>	DF	21	-2.44±0.11	-1.52	-3.44±0.07	-3.83	1.00±0.08
68 长柱沙参 <i>Adenophora stenanthina</i>	DF	15	-1.15±0.04	-0.92	-1.82±0.05	-2.15	0.68±0.04
69 知母 <i>Anemarrhena asphodeloides</i>	MF	21	-2.02±0.04	-1.85	-2.53±0.11	-3.11	0.51±0.06
70 猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	AP	43	-1.26±0.06	-0.74	-2.03±0.10	-3.2	0.76±0.08
71 紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	DF	19	-0.86±0.06	-0.22	-1.50±0.12	-2.32	0.64±0.09

AP (Annual plant): 一年生植物; MF (Monocotyledonous forb): 单子叶杂类草; DF (Dicotyledonous forb): 双子叶杂类草; PG (Perennial grass): 多年生禾草; SS (Shrub and subshrub): 灌木与半灌木