

蒙古沙冬青群落区系组成及分类研究

马惠成, 李小伟*, 杨君珑, 刘小龙, 王旭

(宁夏大学 农学院, 银川 750021)

摘要: 蒙古沙冬青是西北地区珍稀濒危树种, 探究区系组成和群落特征对于维持西北干旱荒漠区脆弱生态系统具有重要意义。该研究调查了 26 个蒙古沙冬青群落样地, 采用 TWINSpan 进行群落分类, 同时利用典范对应分析(CCA)分析沙冬青群落物种组成与生态因子的关系, 为珍稀濒危植物蒙古沙冬青的保护提供基础数据。结果表明: (1) 蒙古沙冬青群落物种组成以豆科、禾本科、菊科和藜科植物为主, 隶属于 28 科 63 属 90 种, 区系组成以地中海、北温带分布及世界分布为主。(2) TWINSpan 等级分类可将 26 个蒙古沙冬青样地划分为 9 个群落类型, 即蒙古沙冬青+蓍状亚菊群落、蒙古沙冬青+红砂群落、蒙古沙冬青+新巴黄耆群落、蒙古沙冬青+无芒隐子草群落、蒙古沙冬青+霸王群落、蒙古沙冬青+驼绒藜群落、蒙古沙冬青+白刺群落、蒙古沙冬青+沙鞭群落和蒙古沙冬青+毛刺锦鸡儿群落。(3) CCA 排序分析显示, 年均降雨量 ($F=2.8, P=0.002$)、生长季降雨量 ($F=2.6, P=0.002$)、速效氮 ($F=2.1, P=0.006$)、太阳辐射量 ($F=2.1, P=0.008$)、蒸汽压 ($F=1.9, P=0.006$)、土壤有机质 ($F=1.7, P=0.04$)、纬度 ($F=1.7, P=0.006$) 是影响蒙古沙冬青群落组成的主要生态因子。

关键词: 蒙古沙冬青; 群落结构; 生态因子; CCA 排序; 濒危植物

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

Study on the Community Classification and Floristic Composition of *Ammopiptanthus mongolicus*

MA Huicheng, LI Xiaowei*, YANG Junlong, LIU Xiaolong, WANG Xu

(College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: *Ammopiptanthus mongolicus* is a rare and endangered species in northwest China. It is of great significance to explore floristic composition and community characteristics to maintain the fragile ecosystem in the arid desert area of northwest China. In this paper, 26 sample sites of *A. mongolicus* were investigated. We used TWINSpan to classify the communities, and canonical correspondence analysis (CCA) to analyze the relationship between species composition and ecological factors of *A. mongolicus*. The results showed that: (1) the species composition of *A. mongolicus* was mainly leguminous, gramineae, compositae and chenopodiaceae, belonging to 28 families, 63 genera and 90 species, and the floristic composition was mainly distributed in Mediterranean, north temperate zone and the world. (2) TWINSpan classification can divide 26 *A. mongolicus* sample plots into 9 community types. (3) According to the ranking analysis of CCA, average annual rainfall ($F=2.8, P=0.002$), the growing season rainfall ($F=2.6, P=0.002$), available nitrogen ($F=2.1, P=0.006$), solar radiation ($F=2.1, P=0.008$), the vapor

收稿日期: 2019-11-07; 修改稿收到日期: 2020-03-11

基金项目: 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); 农业部草地资源监测项目(2016)

作者简介: 马惠成(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为草地生态、资源与环境。E-mails: mahcnxu@163.com

* 通信作者: 李小伟, 教授, 硕士生导师, 主要从事植物区系与生态研究工作。E-mail: lxwbq@126.com

pressure ($F = 1.9, P = 0.006$), soil organic matter ($F = 1.7, P = 0.04$), latitude ($F = 1.7, P = 0.006$) are the main ecological factors affecting the *A. mongolicus* community composition, the results can provide the protection of the rare and endangered plants of Mongolia sand Holly with basic data.

Key words: *Ammopiptanthus mongolicus*; community structure; ecological factors; CCA sorting; endangered plants

蒙古沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)隶属于豆科沙冬青属,分布于亚洲中部荒漠区,是常绿阔叶强旱生灌木,也是第三纪荒漠区孑遗植物^[1]。在中国主要分布于宁夏、内蒙古西部和甘肃中部等干旱地区,是国家三级重点保护珍稀濒危树种^[2-4]。蒙古沙冬青是优良的水土保持植物,常被用于防风固沙^[5],对维持西北干旱荒漠区脆弱的生态系统有着重要的意义^[6]。近几十年,由于全球气候变化和土地利用方式的改变,蒙古沙冬青的生境遭到破坏,栖息地破碎化,种群数量不断缩小,濒危状态逐渐加剧^[7]。对此,许多学者在蒙古沙冬青植物地理分布和生境特征^[3]、生理生化^[8-10]、遗传学^[11-12]、分子生物学^[13]、群落特征^[14]、群落土壤养分特征空间异质性^[15]和濒危原因等领域做了大量的研究。前人大多数研究工作主要在较小的空间尺度,基于个体和种群水平;因此,从植被生态学角度和宏观尺度上探究蒙古沙冬青群落和生态因子相互关系对于保护沙冬青有着重要的生态学意义^[16]。

近年来,随着植被分类排序在生态学研究领域广泛应用^[17],该方法已然成为植被生态学研究物种—环境关系的重要方法之一^[18-19],运用此方法不仅可以把植物群落类型的分布格局与环境资料进行客观定量地分析,而且还能给出群落类型分布及其生态因子变化的具体关系^[20],更进一步揭示植物种、植物群之间的生态关系,被广泛运用到植被群落研究。

鉴于此,选取优势蒙古沙冬青群落为研究对象,调查了 26 个样地,并利用 TWINSpan 群落分类形式和 CCA(canonical correspondence analysis)排序 2 种分析方法研究了蒙古沙冬青群落组成与环境因子的关系,主要回答以下两个问题:(1)蒙古沙冬青群落区系组成和群落类型;(2)影响沙冬青群落组成的生态因子是什么?其结果可以为蒙古沙冬青群落学的深入研究以及该物种的就地保护提供基础资料和理论指导。

1 研究地区及研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区域是北至内蒙古西部的中蒙边境,南到

宁夏固原市须弥山,东起鄂尔多斯乌审旗,西至额济纳旗东北部雅干附近(图 1),涵盖了蒙古沙冬青的主要分布区域。地理坐标为 36°27′~41°77′N,104°79′~107°15′E,海拔 1 023~1 883 m。属于温带大陆性气候,生长季年降水量在 64~224 mm。年均温在 10℃左右,年均蒸发量大于 2 000 mm,降雨变化波动大,蒸汽压为 5.04~9.48 kPa^[21]。

该研究区土壤以沙砾质及砾质土壤为主,保水保肥能力弱,易沙质化。该群落沙生灌木种主要以蒙古沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)和四合木(*Tetraena mongolica*)等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样方调查

2018 年 8 月,根据蒙古沙冬青在宁夏和内蒙古西部分布状况设置了 26 个样地,利用手持 GPS 测定每个样地的经度(LON)、纬度(LAT)和海拔(ALT),在每个样地随机设置 3 个 10 m×10 m 灌木的样方,并在每个灌木样方内设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方。记录样方内出现的植物种名,测定其高度、多度和盖度等。

1.2.2 土壤样品采集

在每个草本样方内用土钻取 0~40 cm 土样,将同一深度的土样样品混合后为一混合样本,重复 3 次;携带回实验室,除去土壤中植物根系和石块等杂质备用,土壤水分(soil water content,SWC)采用烘干法测定,土壤全氮(total ni-

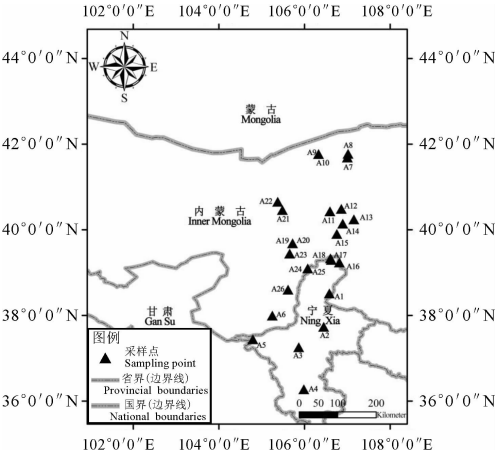


图 1 蒙古沙冬青采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling plots for *A. mongolicus*

trogen, TN)采用凯氏定氮法(全自动凯氏定氮仪 K-360, BUCHI Labortechnik AG, Switzerland)测定;pH 值采用电位法测定(雷磁 pHS-3G pH 计);土壤全磷(total phosphorus, TP)采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮,流速分析仪(Skalar Analytical B. V., Netherlands)测定;土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾外加热法测定。土壤速效氮(soil available nitrogen, SAN)含量测定采用碱解扩散法;土壤速效磷(soil available phosphorus, SAP)含量采用碳酸氢钠浸提及分光光度法测定。

1.2.3 气候数据 气候数据均来自世界气候网站(<http://worldclim.org/>),该数据集提供了全球 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 分辨率近 50 年的月平均气象数据。根据月均数据,来计算年均降雨量(mean annual precipitation, MAP)、生长季降雨量(growth season precipitation, GSP)、年均温(mean annual temperature, MAT)、太阳辐射(solar radiation, SRAD)、最高年均温度(mean maximum temperature, $T_{\max}$)和最低年均温度(mean minimum temperature, $T_{\min}$)。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 重要值计算方法

重要值的计算公式^[22]如下:

草本重要值 $P_i=(\text{相对高度}+\text{相对盖度}+\text{相对频度}+\text{相对多度})/4$

灌木重要值 $P_i=(\text{相对高度}+\text{相对盖度}+\text{相对频度}+\text{相对多度})/4$

1.3.2 数据处理 蒙古沙冬青群落植被数据是由 26×90 的样方重要值构成的矩阵,以重要值为属性进行分类和排序;采用 TWINSpan 2.3 软件将蒙古沙冬青群落物种矩阵导入通用程序进行群落类型划分;应用 Canoco 5.1 做 CCA 排序分析,用以分析影响蒙古沙冬青群落的主要生态因子。

2 结果与分析

2.1 蒙古沙冬青群落区系组成

2.1.1 科属组成 通过对蒙古沙冬青研究区 26 个样地群落数据进行整理,共发现了 28 科 63 属 90 个种子植物(表 1)。

2.1.2 蒙古沙冬青群落属的区系特征 植物群落中属分布型分析可以探究植物群落的性质、起源和分布。根据吴征镒^[23]中国种子植物属的分布区类型对蒙古沙冬青群落属的区系特征进行分析(表 2)。结果表明:蒙古沙冬青群落的属的区系特征以地中海分布为主,占总属数的 19.05%。其次北温带

表 1 蒙古沙冬青群落物种组成
Table 1 Composition of community species of *A. mongolicus*

科名 Family	属名 Genus	种名 Species
豆科 Fabaceae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	毛刺锦鸡儿、柠条锦鸡儿、短脚锦鸡儿、狭叶锦鸡儿、中间锦鸡儿、荒漠锦鸡儿 <i>Caragana tibetica</i> , <i>C. korshinskii</i> , <i>C. brachypoda</i> , <i>C. stenophylla</i> , <i>C. intermedia</i> , <i>C. roborovskyi</i>
	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>
	黄耆属 <i>Astragalus</i>	单叶黄耆、短龙骨黄耆、新巴黄耆、糙叶黄耆 <i>Astragalus efoliolatus</i> , <i>A. parvicarinatus</i> , <i>A. hsinbaticus</i> , <i>A. scaberrimus</i>
	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>
	岩黄耆属 <i>Hedysarum</i>	短翼岩黄耆、贺兰山岩黄耆 <i>Hedysarum brachypterum</i> , <i>H. petrovii</i>
	沙冬青属 <i>Ammopiptanthus</i>	蒙古沙冬青 <i>Ammopiptanthus mongolicus</i>
禾本科 Gramineae	针茅属 <i>Stipa</i>	戈壁针茅、长芒草、沙生针茅、短花针茅 <i>Stipa tianschanica</i> , <i>S. bungeana</i> , <i>S. glareosa</i> , <i>S. breviflora</i>
	九顶草属 <i>Enneapogon</i>	九顶草 <i>Enneapogon borealis</i>
	冰草属 <i>Agropyron</i>	蒙古冰草、冰草 <i>Agropyron mongolicum</i> , <i>A. cristatum</i>
	锋茅草属 <i>Tragus</i>	锋茅草 <i>Tragus racemosus</i>
	狗尾草属 <i>Setaria</i>	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>
	隐子草属 <i>Cleistogenes</i>	无芒隐子草、糙隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i> , <i>C. squarrosa</i>
	沙鞭属 <i>Psammochloa</i>	沙鞭 <i>Psammochloa villosa</i>
	芨芨草属 <i>Achnatherum</i>	芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>
	狼尾草属 <i>Pennisetum</i>	白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>
	细柄茅属 <i>Ptilagrostis</i>	中亚细柄茅 <i>Ptilagrostis pelliotii</i>

续表 1 Continued Table 1		
科名 Family	属名 Genus	种名 Species
菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	白莎蒿、黑沙蒿、猪毛蒿 <i>Artemisia blepharolepis</i> , <i>A. ordosica</i> , <i>A. scoparia</i>
	亚菊属 <i>Ajania</i>	蓍状亚菊 <i>Ajania achilloides</i>
	菊属 <i>Dendranthema</i>	楔叶菊 <i>Dendranthema nakdongense</i>
	蓝刺头属 <i>Echinops</i>	砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>
	鸦葱属 <i>Scorzonera</i>	叉枝鸦葱 <i>Scorzonera sericeo</i>
	旋覆花属 <i>Inula</i>	蓼子朴 <i>Inula salsoloides</i>
	狗娃花属 <i>Heteropappus</i>	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>
	蝟菊属 <i>Olgaea</i>	火媒草 <i>Olgaea leucophylla</i>
藜科 Chenopodiaceae	紫菀木属 <i>Asterothamnus</i>	中亚紫菀木 <i>Asterothamnus centralasiaticus</i>
	驼绒藜属 <i>Ceratoides</i>	驼绒藜 <i>Ceratoides latens</i>
	梭梭属 <i>Haloxylon</i>	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>
	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	松叶猪毛菜、刺沙蓬 <i>Salsola laricifolia</i> , <i>S. ruthenica</i>
	盐生草属 <i>Halogeton</i>	白茎盐生草 <i>Halogeton arachnoideus</i>
	雾冰藜属 <i>Bassia</i>	雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>
	沙蓬属 <i>Agriophyllum</i>	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>
	驼蹄瓣属 <i>Zygophyllum</i>	蝎虎驼蹄瓣 <i>Zygophyllum mucronatum</i>
蒺藜科 Zygophyllaceae	虫实属 <i>Corispermum</i>	蒙古虫实 <i>Corispermum mongolicum</i>
	蒺藜属 <i>Tribulus</i>	蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>
	四合木属 <i>Tetraena</i>	四合木 <i>Tetraena mongolica</i>
	白刺属 <i>Nitraria</i>	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>
百合科 Liliaceae	霸王属 <i>Sarcozygium</i>	霸王 <i>Sarcozygium xanthoxylon</i>
	葱属 <i>Allium</i>	青甘韭、蒙古韭、多根葱 <i>Allium przewalskianum</i> , <i>Allium mongolicum</i> , <i>Allium polyrhizum</i>
蔷薇科 Roseaceae	天门冬属 <i>Asparagus</i>	戈壁天门冬、西北天门冬 <i>Asparagus gobicus</i> , <i>Asparagus persicus</i>
	桃属 <i>Amygdalus</i>	山桃、蒙古扁桃 <i>Amygdalus davidiana</i> , <i>Amygdalus mongolica</i>
旋花科 Convolvulaceae	绵刺属 <i>Potaninia</i>	绵刺 <i>Potaninia mongolica</i>
	菟丝子属 <i>Cuscuta</i>	菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i>
怪柳科 Tamaricaceae	旋花属 <i>Convolvulus</i>	灌木旋花、刺旋花、银灰旋花 <i>Convolvulus fruticosus</i> , <i>Convolvulus tragacanthoides</i> , <i>Convolvulus ammannii</i>
	红砂属 <i>Reaumuria</i>	红砂、黄花红砂 <i>Reaumuria songarica</i> , <i>Reaumuria trigyna</i>
大戟科 Euphorbiaceae	大戟属 <i>Euphorbia</i>	地锦、乳浆大戟、沙生大戟 <i>Euphorbia humifusa</i> , <i>Euphorbia esula</i> , <i>Euphorbia kozlovii</i>
松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>
木犀科 Oleaceae	丁香属 <i>Syringa</i>	华北紫丁香 <i>Syringa oblata</i>
桦木科 Betulaceae	虎榛子属 <i>Ostryopsis</i>	虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i>
榆科 Ulmaceae	榆属 <i>Ulmus</i>	旱榆 <i>Ulmus glaucescens</i>
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	小车前 <i>Plantago minuta</i>
马鞭草科 Verbenaceae	莸属 <i>Caryopteris</i>	蒙古莸 <i>Caryopteris mongholica</i>
伞形花科 Umbelliferae	阿魏属 <i>Ferula</i>	沙茴香 <i>Ferula bungeana</i>
石竹科 Caryophyllaceae	石头花属 <i>Gypsophila</i>	草原石头花 <i>Gypsophila oldhamiana</i>
莎草科 Cyperaceae	藁草属 <i>Carex</i>	寸草 <i>Carex duriuscula</i>
芸香科 Rutaceae	拟芸香属 <i>Haplophyllum</i>	北芸香 <i>Haplophyllum dauricum</i>
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	细叶鸢尾、大苞鸢尾 <i>Iris tenuifolia</i> , <i>Iris bungei</i>

续表 1 Continued Table 1		
科名 Family	属名 Genus	种名 Species
远志科 Polygalaceae	远志属 <i>Polygala</i>	远志 <i>Polygala tenuifolia</i>
十字花科 Brassicaceae	燥原芥属 <i>Ptilotricum</i>	燥原芥 <i>Ptilotricum canescens</i>
亚麻科 Linaceae	亚麻属 <i>Linum</i>	宿根亚麻 <i>Linum perenne</i>
唇形科 Labiatae	兔唇花属 <i>Lagochilus</i>	冬青叶兔唇花 <i>Lagochilus iliciifolius</i>
萝藦科 Asclepiadaceae	鹅绒藤属 <i>Cynanchum</i>	地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>
蓼科 Polygonaceae	木蓼属 <i>Atraphaxis</i>	锐枝木蓼 <i>Atraphaxis pungens</i>
	沙拐枣属 <i>Calligonum</i>	沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>

表 2 沙冬青群落中属的分布区型			
Table 2 The distribution of genera in the community of <i>A. mongolicus</i>			
序号 Order	分布区类型 Type of distribution area	属数 Generic	属数占总属数比例 Percentage of genera in total/%
1	世界分布 Cosmopolitan	7	11.11
2	泛热带分布 Pantropic	5	7.94
3	旧世界热带分布 Old World Tropics	1	1.59
4	北温带分布 North Temperate	9	14.29
5	北温带和南温带间断分布“全温带” N. Temp. & S. Temp. disjuncted. (“Pan-temperate”)	2	3.17
6	东亚和北美洲间断分布 E. Asia & N. Amer. Disjuncted	1	1.59
7	旧世界温带分布 Old World Temperate	6	9.52
8	地中海区、西亚(或中亚)和东亚间断分布 Mediterranean, W. Asia (or C. A-sia) & E. Asia disjuncted	4	6.35
9	温带亚洲分布 Temp. Asia	3	4.76
10	地中海区、西亚至中亚分布 Mediterranean, W. Asia to C. Asia	12	19.05
11	地中海区至中亚和墨西哥至美国南部间断分布 Mediterranean to C. Asia & S. Africa, Australasia disjuncted	2	3.17
12	中亚分布 C. Asia	2	3.17
13	中亚东部(亚洲中部) East C. Asia (or Asia Media)	4	6.35
14	东亚分布 E. Asia	3	4.76
15	中国特有分布 Endemic to China	2	3.17
合计 Total		63	100

和世界分布,分别占总属数的 14.29%和11.11%,这和内蒙古植物区系组成特征相一致。

2.2 蒙古沙冬青群落物种组成(重要值)

本研究以物种重要值分析植物物种在群落中的相对重要性。在 26 个蒙古沙冬青群落样地中共发现 30 种灌木植物和 60 种草本植物。灌木植物重要值排名前十分别是:蒙古沙冬青、霸王、白刺、猫头刺、绵刺、蒙古扁桃、短脚锦鸡儿、红砂、松叶猪毛菜和驼绒藜。草本植物重要值排名前十分别是:狗尾草、蒺藜、猪毛蒿、蒙古韭、蓍状亚菊、九顶草、无芒隐子草、沙生针茅、刺沙蓬和沙鞭。蒙古沙冬青群落中除蒙古沙冬青具有绝对优势地位外,其他伴生的草本物种和灌木物种具有较一致的重要值分布(表 3)。

2.3 蒙古沙冬青群落分类与排序

2.3.1 蒙古沙冬青群落 TWINSpan 分类 对蒙古沙冬青的 26 个样地进行 TWINSpan 等级分类, TWINSpan 树状分类如图 2 所示。

依据 TWINSpan 分类的结果将这 26 个样地划分为 9 个群落类型:

I. 蒙古沙冬青+蓍状亚菊群落

该群落类型包括样地 A5、A17、A18、A25,分布于宁夏吴忠市红寺堡麻黄沟、内蒙古乌海市道路沟、宁夏石嘴山市惠农区枣子沟及内蒙古阿拉善盟左旗福因寺附近,海拔 1 423~1 796 m。群落高度为 3~410 cm,盖度为 21.00%~88.51%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为蓍状亚菊及猪毛蒿,伴生种为

旱榆、猪毛蒿、细柄茅、白茅、短花针茅、银灰旋花、松叶猪毛菜和蒙古扁桃等。

II. 蒙古沙冬青+红砂群落

该群落类型包括样地 A1、A2,分布于宁夏银川

表 3 蒙古沙冬青群落样地灌木及草本重要值前 10 位排序
Table 3 The important values of shrubs and herbs in the sample plot of *A. mongolicus* were ranked in the top 10

	种名 Species	重要值 Important value
灌木 Shrub	蒙古沙冬青 <i>Ammopiptanthus mongolicus</i>	0.400 7
	霸王 <i>Sarcozygium xanthoxylon</i>	0.089 1
	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	0.084 8
	猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>	0.036 1
	绵刺 <i>Potania mongolica</i>	0.033 8
	蒙古扁桃 <i>Amygdalus mongolica</i>	0.021 8
	短脚锦鸡儿 <i>Caragana brachypoda</i>	0.021 7
	红砂 <i>Reaumuria songarica</i>	0.020 5
	松叶猪毛菜 <i>Salsola larici folia</i>	0.018 0
	驼绒藜 <i>Ceratoides latens</i>	0.016 7
草本 Herbaceous	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	0.086 0
	蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>	0.069 7
	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	0.061 4
	蓍状亚菊 <i>Ajania achilloides</i>	0.045 6
	无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	0.036 5
	九顶草 <i>Enneapogon borealis</i>	0.036 5
	刺沙蓬 <i>Salsola ruthenica</i>	0.035 2
	蒙古韭 <i>Allium mongolicum</i>	0.030 0
	戈壁针茅 <i>Stipa tianschanica</i>	0.027 6
	沙鞭 <i>Psammochloa villosa</i>	0.025 6

市灵武市黄泥岗及固原须弥山附近,海拔 1 135~1 239 m。群落高度为 12~240 cm,群落盖度为 32.84%~95.37%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为九顶草及红砂,伴生种有猪毛蒿、刺沙蓬、短花针茅、锋芒草、狗尾草和白刺等。

III. 蒙古沙冬青+新巴黄耆群落

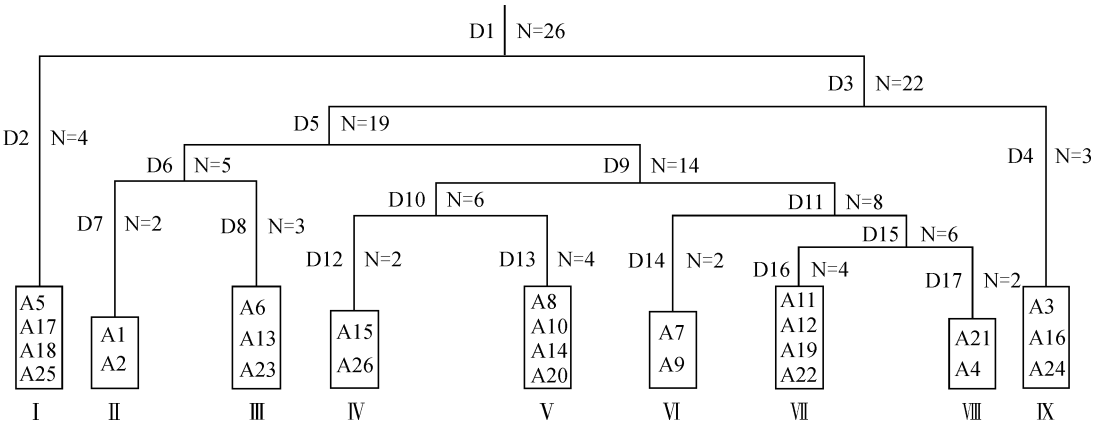
该群落类型包括样地 A6、A13、A23,分布于内蒙古阿拉善盟乌兰陶乐盖、内蒙古巴彦淖尔呼舒及内蒙古阿拉善盟左旗艾布伦曾陶乐盖地区附近,海拔 1 095~1 329 m。群落高度为 8~160 cm,盖度为 34.86%~66.03%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为狗尾草及新巴黄耆,伴生种有狗尾草、霸王、蒺藜、刺沙蓬、锋芒草及蒙古韭等。

IV. 蒙古沙冬青+无芒隐子草群落

该群落类型包括样地 A15、A26,分布于内蒙古鄂尔多斯鄂托克旗阿山大队附近及内蒙古阿拉善盟左旗那木克特勒地区,海拔 1 084~1 334 m。群落高度为 7~140 cm,盖度为 33.52%~70.83%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为蒺藜及无芒隐子草,伴生种为白刺、蒺藜、短脚锦鸡儿、猫头刺、蒙古韭和霸王等。

V. 蒙古沙冬青+霸王群落

该群落类型包括样地 A8、A10、A14、A20,分布于内蒙古巴彦淖尔乌拉特后旗冈干、乌拉特后旗陶那亭廷巴润呼舒、鄂尔多斯鄂托克旗 G110 国道及阿拉善盟左旗吉兰泰镇附近地区、鄂托克旗和阿拉善左旗地区,海拔 1 074~1 306 m。群落高度为 7~170 cm,盖度为 21.03%~80.04%,优势种为蒙古



方框内的代号代表 26 样地编号,方框下数字表示为群落编号;D. 表示分类等级;N. 处理数;A1~A26;26 个蒙古沙冬青样地。下同

图 2 蒙古沙冬青群落样地的 TWINSpan 分类结果树状示意图

The code in the box represents the number of 26 plots, and the number under the box represents the community number;
D. Classification grade;N. Treatment number;A1~A26. 26Ammopiptanthus plots. The same as below
Fig. 2 Tree diagram of TWINSpan classification results of the sample sites of *A. mongolicus*

表 4 蒙古沙冬青群落样地与生态因子 CCA 排序

Table 4 Order of *A. mongolicus* community sample plots and ecological factor CCA

指标 Index	第一轴 The first axis	第二轴 The second axis	第三轴 The third axis	第四轴 The fourth axis
特征值 Eigenvalues	0.712 3	0.484 0	0.323 7	0.293 4
累积解释变量 Explained variation (cumulative)	13.96	23.44	29.78	35.53
非典型相关 Pseudo-canonical correlation	0.985 1	0.987 7	0.992 5	0.911 1
累计解释拟合变量 Explained fitted variation (cumulative)/%	20.06	33.68	42.8	51.06

沙冬青,次优势种为狗尾草及沙蓬,伴生种为狗尾草、蒺藜、雾冰藜、猫头刺、柠条锦鸡儿和霸王等。

Ⅵ. 蒙古沙冬青+驼绒藜群落

该群落类型包括样地 A7、A9,分布于内蒙古阿拉善盟左旗呼德呼仁附近及巴彦淖尔乌拉特后旗乌日海音多日伯勒金附近,海拔 1 132~1 423 m。群落高度为 5~139 cm,盖度为 26.06%~51.46%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为短脚锦鸡儿及蒙古韭,伴生种为霸王、驼绒藜、绵刺、蒙古虫实、蒺藜和狗尾草等。

Ⅶ. 蒙古沙冬青+白刺群落

该群落类型包括样地 A11、A12、A19、A22,分布于内蒙古巴彦淖尔磴口县扎干乌苏、巴彦淖尔磴口县塔图塔克海子、阿拉善盟左旗沙勒吉敖包及阿拉善盟左旗绍荣查干附近地区,海拔 1 023~1 335 m。群落高度为 18~180 cm,盖度为 20.24%~97.05%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为白刺及叉枝鸦葱,伴生种为白沙蒿、梭梭、刺沙蓬和雾冰藜等。

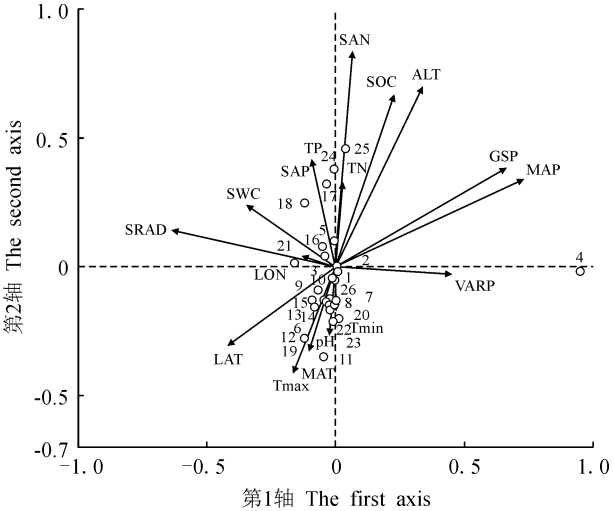
Ⅷ. 蒙古沙冬青+沙鞭

该群落类型包括样地 A21、A4,分布于宁夏中卫市海原县罗家湾村及内蒙古阿拉善盟左旗昂布向德附近,海拔 1 607~1 697 m。群落高度为 12~140 cm,盖度为 21.02%~41.27%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为沙鞭及白沙蒿,伴生种为山桃、虎榛子、草原石头花、旱榆和短翼岩黄耆等。

Ⅸ. 蒙古沙冬青+毛刺锦鸡儿

该群落类型包括样地 A3、A16、A24,分布于宁夏吴忠市同心县苏英庄子、内蒙古乌海市海南区二柜沟及阿拉善盟左旗红嵌嵌子沟附近,海拔 1 118~1 883 m。群落高度为 3~105 cm,盖度为 27.07%~80.84%,优势种为蒙古沙冬青,次优势种为毛刺锦鸡儿及九顶草,伴生种为刺沙蓬、猪毛蒿、九顶草、蒺藜、猫头刺、无芒隐子草和雾冰藜等。

2.3.2 植物群落典范对应分析(CCA) 先用物种数据进行 CCA 分析^[24],在 4 个排序轴中梯度长度最大值 4.3,因此选择单峰模型最为合适,对选取的



A1~A26. 蒙古沙冬青群落样地,实线箭头为生态因子;SOC. 土壤有机碳;LAT. 纬度;Tmax. 最高温度;MAT. 年均温度;TN. 土壤全氮;SAN. 土壤速效氮;SRAD. 太阳辐射量;Tmin. 最低温度;LON. 经度;MAP. 年均降雨量;VARP. 蒸汽压;TP. 土壤全磷;SAP. 土壤速效磷;SWC. 土壤含水率;GSP. 生长季降雨量;ALT. 海拔;pH. 土壤 pH

图 3 不同蒙古沙冬青样地与生态因子的 CCA 排序图
A1—A26. *Ammopiptanthus* community sample plots, solid line arrow is ecological factor; SOC. Soil organic carbon; LAT. Latitude; Tmax. Maximum temperature; MAT. Annual average temperature; TN. Soil total nitrogen; SAN. Soil available nitrogen; SRAD. Solar radiation; Tmin. Minimum temperature; LON. Longitude; MAP. Annual rainfall; VARP. Vapor pressure; TP. Soil total phosphorus; SAP. Soil available phosphorus; SWC. Soil moisture content; GSP. Rainfall in growth season; ALT. Altitude; pH. Soil pH

Fig. 3 CCA sequencing diagram of different *A. mongolicus* sample plots and ecological factors

26 个不同样地的蒙古沙冬青草本及灌木群落样地与生态因子进行 CCA 排序(表 4、图 3)。结果显示:在 CCA 的 4 个排序轴上环境可以解释 51.06%的变量。

对所在的 26 个蒙古沙冬青群落样地和生态因子进行 CCA 排序(图 3),反映了沙冬青群落中物种的重要值在生态因子之间的关系,箭头越长表示对蒙古沙冬青群落组成的解释量越大。箭头之间的角度代表了变量之间的相关性。角度越小,相关性越

大,反之则越小。

通过对 26 个不同蒙古沙冬青群落样地 90 个物种与生态因子的 CCA 排序,不同群落样地物种重要值和年均降雨量($F=2.8, P=0.002$)、生长季降雨量($F=2.6, P=0.002$)、速效氮($F=2.1, P=0.006$)、太阳辐射量($F=2.1, P=0.008$)、蒸汽压($F=1.9, P=0.006$)、纬度($F=1.7, P=0.006$)、土壤有机质($F=1.7, P=0.04$)等生态因子的影响显著。但受海拔($F=2.0, P=0.194$)、年均最高温度($F=1.5, P=0.06$)、年均温度($F=1.4, P=0.106$)、土壤含水率($F=1.3, P=0.098$)、土壤全氮($F=1.2, P=0.204$)、土壤全磷($F=1.3, P=0.186$)、土壤速效磷($F=1.3, P=0.202$)、年均最低温度($F=1.2, P=0.148$)、土壤 pH($F=1.1, P=0.314$)、经度($F=0.7, P=0.924$)生态因子的影响不显著。土壤速效氮和土壤有机质对第一轴的解釋量最大,样地基本沿第一轴分布,表明蒙古沙冬青群落对土壤速效氮和土壤有机质的响应差异最大。

3 讨 论

3.1 蒙古沙冬青群落区系组成与群落分类

本研究沙冬青分布北至中蒙边境,南至固原须弥山,共涉及 26 个样地,发现植物物种数 28 科 63 属 90 种,而张强等^[14]发现沙冬青属植物群落有 21 科 54 属 79 种植物,本研究比其多 7 科 9 属 11 种。这是由于研究区域的空间尺度之间存在差异,本次调查区域空间范围更广泛是导致蒙古沙冬青群落的物种数目更丰富的重要原因。本研究符合西北区系组成科属的总体特征,虽然科属类型较多,但各科所包含种的数目较少^[25]。蒙古沙冬青群落中,禾本科以 10 属 15 种居于首位,突出以狗尾草为优势种,其次豆科有 6 属 15 种,以灌木蒙古沙冬青为优势种。本研究中蒙古沙冬青群落豆科、禾本科、菊科、藜科和蒺藜科为优势科,这些科都是西北干旱荒漠区的表征科^[26-27]。此结果与张强等^[14]所报道的沙冬青属群落中藜科(14 种)植物占据主导,菊科(约 12 种)次之的结论有所不同。

蒙古沙冬青群落区系地理成分以地中海区分布为主,约占 19.05%。其次是北温带分布,约占 14.29%。这与段义忠等^[2]对蒙古沙冬青群落特征及与生态因子的关系的研究一致,反映了蒙古沙冬青对于干旱荒漠生境良好的适应性。区系组成可以划分为 15 个属的分布型,表明成分比较复杂,这和张强等^[14]对沙冬青属的区系组成和结构研究相类似。

蒙古沙冬青群落物种在地理分布上的这些特点,与它所处的分布区有相关性^[28]。蒙古沙冬青处于荒漠带和草原带交汇地区,也是各种区系植被相互交汇地带,许多科属只包含单一种^[29]。本次调查中,除蒙古沙冬青外,群落中还包含其他珍稀濒危物种,例如:四合木(*Tetraena mongolica*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)和蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*)等^[30],表明该区域具有一定的物种多样性,但生态系统也更脆弱,更具物种丧失的危险^[31]。

重要值^[32]是反映草本及灌木在群落中作用和地位的综合数量指标。在群落物种分类的过程中,多元分化技术所具有的理论上的优势在于所有有意义的信息都可以被使用以便构成最严格的分化^[23]。TWINSpan 数量分类是根据指示种和地区之间的分布差异划分,同时完成样地和植物种分类,是当今最主要的分类方法;TWINSpan 的等级分类能够合理地将不同类型的植物群落分开,本研究依据 TWINSpan 分类将蒙古沙冬青 26 个样方划分为 9 个群落类型,并且各个植物群落在植物组成、高度和盖度等方面存在一定差异^[33]。蒙古沙冬青+沙鞭的高度及盖度范围域在所有已分类的群落中相对较低,这与群落所存在的优势和次优势建群种关系密不可分;划分的蒙古沙冬青群落的主要原因是群落之间存在生活条件差异,由于地处温带大陆性气候,土壤以沙砾质及砾质土为主,且水分的梯度性变化明显。因此环境条件的差异,是引起植被类型的分化,使随之而形成的植被类型的分异显而易见。

3.2 蒙古沙冬青群落影响因素

CCA 排序轴综合信息既反映了样方间在种类组成上的相似性,又间接反映了样方之间的环境因子组成的相似性^[34];同时反映了一定的生态梯度,能够解释植物物种的分布与环境因子之间的关系,筛选主要的生态因子^[35]。本研究 CCA 排序表明^[36]:影响蒙古沙冬青群落的主要生态因子是降雨量、蒸汽压、速效氮、土壤有机质、纬度、太阳辐射量。沙冬青分布区域南北狭长,地形南高北低,空间变化导致南北方向水热梯度变化最为剧烈,其中年平均降雨量逐渐减少从 224 mm 降至 33 mm;而年平均温度从 6.76℃ 升至 11.25℃;纬度方向水热变化最为剧烈,其中年均降雨量变幅最大,因此年均降雨量对该沙冬青群落组成影响显著。蒙古沙冬青群落大多地处干旱荒漠区,生长地带降雨量大概维持在 33~224 mm 之间,由于沙冬青生长发育对水分利用敏感,饱和蒸汽压的大小直接影响到植物的蒸腾作

用和光合速率^[37],而太阳辐射量越大,相应的饱和蒸汽压所受亏缺越大,与本研究结果一致^[38]。研究区域水分平衡主要受蒸散作用的影响,而蒸散作用与太阳辐射和年均降雨量密切相关。且本研究结果显示降雨量、蒸汽压和太阳辐射量是影响蒙古沙冬青群落组成的气候因素^[39]。除此之外,有研究表明植物群落中草本层会受灌木层的盖度、高度等状况的影响^[40],对生存环境的利用也存在制约现象。群落不同生存条件下,生态因子对不同地区蒙古沙冬青群落的影响各异。

本研究中发现土壤因子的空间分布较好地揭示了群落的分布,这与多数研究结果相符^[41]。受沙埋沙压和风蚀等影响,表层土壤较为疏松,致使土壤中有机质和氮的空间异质性变异尺度增大^[42],土壤中含有的有机质及氮含量作为土壤肥力因素影响群落物种的生长显得尤为重要;灌木可以加剧灌丛下的养分积累,形成“肥岛”,从而促进了蒙古沙冬青群落的定居^[43]。因此土壤速效氮、有机质等对蒙古沙冬青物种之间也存在分明的交互影响作用^[3]。较高的土壤速效氮和土壤有机质在蒙古沙冬青群落样地中所呈现的空间异质性,与贾晓红等^[15]对沙冬青群落土壤有机碳和土壤氮含量的空间异质性研究结论相似,这也影响了物种群落种类分布组成及空间动态格局^[44];也正因为蒙古沙冬青土壤肥力中的有机质和速效氮空间上变异的格局与尺度,不针对其他入侵植物种创造土壤基础条件,也就为该物种在沙生植被区

保持了优势度提供了强有力的保障^[45]。除了上述土壤因子影响外,太阳辐射量既显著提高氮素积累量,又参与着土壤含水量条件和参与有机质的分解作用^[46],最终成为影响蒙古沙冬青群落结构的主要生态因子。综上所述,各生态因子之间存在的相互作用及土壤肥力分布格局及尺度都是制约着沙生灌木生长的最主要原因^[47],这为该植物种作为西北地区生长优势种和生物的多样性提供有力的理论依据。

4 结 论

(1)蒙古沙冬青群落生长的荒漠干旱区的群落物种为 28 科 63 属 90 种,具有的科属种类较多,均表现出干旱荒漠化草原的特征。地理分布以地中海分布和北温带分布为主,也有中国特有分布,且区系分布较为复杂。群落结构以灌木和多年生草本为主;灌木以蒙古沙冬青为优势种,草本以狗尾草为优势种。

(2)利用 TWINSpan 分类将蒙古沙冬青 26 个样地 90 种物种划分为 9 个样地群落类型,分别为蒙古沙冬青+蓍状亚菊群落、蒙古沙冬青+红砂群落、蒙古沙冬青+新巴黄耆群落、蒙古沙冬青+无芒隐子草群落、蒙古沙冬青+霸王群落、蒙古沙冬青+驼绒藜群落、蒙古沙冬青+白刺群落、蒙古沙冬青+沙鞭群落和蒙古沙冬青+毛刺锦鸡儿群落。

(3)通过 CCA 排序对蒙古沙冬青群落分析有着重要影响的生态因子有年均降雨量、生长季降雨量、速效氮、太阳辐射量、蒸汽压、纬度、土壤有机质。

参考文献:

[1] WEI H H, WU P, GE X J, *et al.* Chemical constituents of the seeds of *Ammopiptanthus* (Leguminosae) and their systematic and ecological significance[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2006, **35**(5): 274-280.

[2] 段义忠, 杜忠毓, 亢福仁. 西北干旱区孑遗濒危植物蒙古沙冬青群落特征及与环境因子的关系[J]. *植物研究*, 2018, **38**(6): 834-842.

DUAN Y Z, DU Z Y, KANG F R. Community characteristics of endangered plant of *Ammopiptanthus mongolicus* to environmental factors in Northwest arid area of China[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, **38**(6): 834-842.

[3] 刘 美, 吴世新, 潘伯荣, 等. 中国沙冬青属植物的地理分布及生境特征[J]. *干旱区地理*, 2017, **40**(2): 380-387.

LIU M, WU S X, PAN B R, *et al.* Geographical distribution and habitat characteristic of [*Ammopiptanthus* (Maxim.) Cheng F.](Fabaceae) in China[J]. *Arid Land Geography*, 2017, **40**(2): 380-387.

[4] 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[J]. *植物生态学报*, 2005, (4): 591-598.

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[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, (4): 591-598.

[5] 董 雪, 辛智鸣, 李新乐, 等. 乌兰布和沙漠沙冬青群落特征的研究[J]. *西北植物学报*, 2017, **37**(8): 1 627-1 634.

DONG X, XIN Z M, LI X L, *et al.* Analysis on *Ammopiptanthus mongolicus* community characteristics in Ulanbuh desert[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(8): 1 627-1 634.

[6] 石丽丽. 蒙古沙冬青和新疆沙冬青叶片解剖结构特征及其抗旱适应性[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.

[7] 刘果厚. 阿拉善荒漠特有植物沙冬青濒危原因的研究[J]. *植物研究*, 1998, (3): 85-89.

LIU G H. Study on the endangered reasons of *Ammopiptanthus mongolicus* in the desert of Alashan[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 1998, (3): 85-89.

[8] 段慧荣, 李 毅, 马彦军. PEG 胁迫对沙冬青种子萌发过程

- 的影响[J]. 水土保持研究, 2011, **18**(3): 221-225.
- DUAN H R, LI Y, MA Y J. Effects of PEG stress on seed germination of *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, **18**(3): 221-225.
- [9] GAO T P, CHEN T, FENG H Y, *et al.* Seasonal and annual variation of osmotic solute and stable carbon isotope composition in leaves of endangered desert evergreen shrub *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. *South African Journal of Botany*, 2006, **72**(4): 570-578.
- [10] 石丽丽, 蒋志荣, 方向文. 新疆沙冬青(*Ammopiptanthus nanus*)和蒙古沙冬青(*A. mongolicus*)叶片解剖特征及抗旱性[J]. 中国沙漠, 2018, **38**(1): 157-162.
- SHI L L, JIANG Z R, FANG X W. Leaf eco-anatomical characteristics of *Ammopiptanthus nanus* and *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. *Journal of Desert Research*, 2018, **38**(1): 157-162.
- [11] 苏志豪, 师 玮, 卓 立, 等. 沙冬青(*Ammopiptanthus*)的遗传结构与保育[J]. 中国沙漠, 2018, **38**(1): 163-171.
- SU Z H, SHI W, ZHUO L, *et al.* Genetic structure of *Ammopiptanthus* and its conservation implications[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, **038**(1): 163-171.
- [12] GE X J, YU Y, YUAN Y M, *et al.* Genetic diversity and geographic differentiation in endangered *Ammopiptanthus* (Leguminosae) populations in desert regions of northwest China as revealed by ISSR analysis[J]. *Annals of Botany*, 2005, **95**(5): 843-851.
- [13] 毕江涛, 贺达汉, 谢瑞梅, 等. 沙冬青根瘤菌结瘤基因 nodA PCR-RFLP 分析[J]. 中国沙漠, 2009, **29**(4): 703-710.
- BI J T, HE D H, XIE R M, *et al.* PCR-RFLP analysis of nodulation gene nodA of rhizobia from *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, **29**(4): 703-710.
- [14] 张 强, 潘伯荣, 张永智, 等. 沙冬青属(*Ammopiptanthus* (Maxim.) Chen f.)植物群落特征分析[J]. 干旱区研究, 2007, (4): 487-494.
- ZHANG Q, PAN B R, ZHANG Y Z, *et al.* Analysis on the characteristics of communities of *Ammopiptanthus nanus* and *A. mongolicus* [J]. *Arid Zone Research*, 2007, (4): 487-494.
- [15] 贾晓红, 李新荣, 张志山. 沙冬青群落土壤有机碳和全氮含量的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2006, (12): 2 266-2 270.
- JIA X H, LI X R, ZHANG Z S. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and nitrogen under *Ammopiptanthus mongolicus* community in arid desert zone [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, (12): 2 266-2 270.
- [16] 郭清华, 胡从从, 贺学礼, 等. 蒙古沙冬青伴生植物 AM 真菌的空间分布[J]. 生态学报, 2016, **36**(18): 5 809-5 819.
- GUO Q H, HU C C, HE X L, *et al.* Exploration of the spatial distribution of AM fungi in the rhizospheres of *Ammopiptanthus mongolicus*-associated plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(18): 5 809-5 819.
- [17] 郑超超, 伊力塔, 张 超, 等. 浙江江山公益林物种间关系及 CCA 排序[J]. 生态学报, 2015, **35**(22): 7 511-7 521.
- ZHENG C C, YI L T, ZHANG C, *et al.* Interspecific relationship and canonical correspondence analysis of the dominant species in ecological service forest of Jiangshan City in Zhejiang Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(22): 7 511-7 521.
- [18] 张 伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 底栖生物生物量空间插值方法研究[J]. 海洋通报, 2010, **29**(3): 351-356.
- ZHANG W, LI C H, JIA X P, *et al.* Research on spatial interpolation methods of Macrobenthic biomass [J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, **29**(3): 351-356.
- [19] 何惠琴, 李绍才, 孙海龙, 等. 锦屏水电站植被数量分类与排序[J]. 生态学报, 2008, (8): 3 706-3 712.
- HE H Q, LI S C, SUN H L, *et al.* Quantitative classification and ordination of Jinping hydropower station, Sichuan Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, (8): 3 706-3 712
- [20] 胡贝娟, 张钦弟, 张 玲, 等. 山西太岳山连翘群落优势种种间关系[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(4): 845-851.
- HU B J, ZHANG Q D, ZHANG L, *et al.* Interspecific relationships of dominant species in *Forsythia suspensa* communities in Taiyue Mountain of Shanxi, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(4): 845-851.
- [21] YE W, XU X Y, WANG H X, *et al.* Quantitative assessment of resources and environmental carrying capacity in the north-west temperate continental climate ecotope of China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(10): 1-15.
- [22] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, **17**(06): 533-548.
- FANG J Y, ZHU J L, GUO Z D, *et al.* Methods and protocols for plant community inventory [J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 533-548.
- [23] 吴征镒. 中国植被[M]北京: 科学出版社, 1983: 593.
- [24] 席跃翔, 张金屯, 李军玲. 关帝山亚高山灌丛草甸群落的数量分类与排序研究[J]. 草业学报, 2004, (1): 15-20.
- XI Y X, ZHANG J T, LI J L. Quantitative classification and sorting of subalpine shrub and meadow land communities on Guandi Mountain [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2004, (1): 15-20.
- [25] 中国科学院新疆综合考察队. 新疆植被及其利用[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 44-65.
- [26] 张永智, 潘伯荣, 尹林克, 等. 新疆沙冬青群落的区系组成与结构特征[J]. 干旱区研究, 2006, (2): 320-326.
- ZHANG Y Z, PAN B R, YIN L K, *et al.* Study on the floristic genera and structure of the community of *Ammopiptanthus nanus* [J]. *Arid Zone Research*, 2006, (2): 320-326.
- [27] 王 乐, 赵利清, 陈 育, 等. 西鄂尔多斯草原化荒漠植物群落多样性[J]. 干旱区研究, 2015, **32**(2): 258-265.
- WANG L, ZHAO L Q, CHEN Y, *et al.* Plant community diversity of steppification desert in west Ordos [J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(2): 258-265.
- [28] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报, 1997, (1): 93-101.
- HE J S, CHEN W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, (1): 93-101.
- [29] 李新蓉, 谭敦炎, 郭江. 迁地保护条件下两种沙冬青的开花物候比较研究[J]. 生物多样性, 2006, (3): 241-249.
- LI X R, TAN D Y, GUO J. Comparison of flowering phenol-

- ogy of two species of *Ammopiptanthus* (Fabaceae) under ex situ conservation in the Turpan Eremophytes Botanical Garden, Xinjiang[J]. *Biodiversity Science*, 2006, (3): 241-249.
- [30] 刘果厚, 高润宇, 赵培英. 珍稀濒危植物沙冬青、四合木、绵刺和半日花等四种旱生灌木在环境胁迫下的生存对策分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2001, (3): 66-69. LIU G H, GAO R Y, ZHAO P Y. Analysis on the survival strategy of four rare and endangered species under the environment stress[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2001, (3): 66-69.
- [31] 刘哲荣, 刘果厚, 高润宏. 内蒙古珍稀濒危植物及其区系研究[J]. 西北植物学报, 2018, 38(9): 1 740-1 752. LIU Z R, LIU G H, GAO R H. Floristic analysis of the rare and endangered plants in Inner Mongolia[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(9): 1 740-1 752.
- [32] 王育松, 上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 312-316. WANG Y S, SHANGGUAN T L. Discussion on calculating method of important values[J]. *Journal of Shanxi University* (Natural Science Edition), 2010, 33(2): 312-316.
- [33] 贾希洋, 马红彬, 周 瑶, 等. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落数量分类和演替[J]. 草业学报, 2018, 27(2): 15-25. JIA X Y, MA H B, ZHOU Y, et al. Floristic quantitative classification and successional characteristics of typical grassland under different ecological restoration methods in the Loess Hilly Region of Ningxia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(2): 15-25.
- [34] 李 斌, 张金屯. 黄土高原植物群落生态关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, (4): 471-473. LI B, ZHANG J T. Ecological interaction of vegetation community in loess plateau[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, (4): 471-473.
- [35] 苏日古嘎, 张金屯, 张 斌, 等. 松山自然保护区森林群落数量分类和排序[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2 621-2 629. SURIGUGA, ZHANG J T, ZHANG B, et al. Numerical classification and ordination of forest communities in the Songshan National Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2 621-2 629.
- [36] 王 林, 冯锦霞, 王双霞, 等. 干旱和坡向互作对栓皮栎和侧柏生长的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2 425-2 433. WANG L, FENG J X, WANG S X, et al. The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2 425-2 433.
- [37] JENNIFER H, ABIGAIL L. S. S, SOO-HYUNG K. Maize yield under a changing climate: The hidden role of vapor pressure deficit[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 279: 107 692.
- [38] LIANG E Y, SHAO X M, ECKSTEIN D, et al. Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau[J]. *Forest Ecology & Management*, 2006, 236(2): 268-277.
- [39] 刘 博, 潘存德, 李贵华, 等. 喀纳斯泰加林火成演替群落数量分类与排序[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 1 961-1 973. LIU B, PAN C D, LI G H, et al. Numerical classification and ordination of fire succession communities in Kanas taiga forest[J]. *Ecology and Environment*, 2019, 28(10): 1 961-1 973.
- [40] 曹 梦, 潘 萍, 欧阳勋志, 等. 飞播马尾松林林下植被组成、多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 1-8. CAO M, PAN P, OUYANG X Z, et al. Relationships between the composition and diversity of understory vegetation and environmental factors in aerially seeded *Pinus massoniana* plantations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1): 1-8.
- [41] KNEITEL J M, LESSIN C L. Ecosystem-phase interactions: aquatic eutrophication decreases terrestrial plant diversity in California vernal pools[J]. *Oecologia*, 2010, 163(2): 461-469.
- [42] 高 燕, 刘 强, 潘 伟. 土壤结构对沙冬青生长发育的影响[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2007, (2): 205-207. GAO Y, LIU Q, PAN W. Influence of different soil structure on seedling of *Ammopiptanthus mongolicus*[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University* (Natural Science Edition), 2007, (2): 205-207.
- [43] SCHLESINGER W H, REYNOLDS J F, CUNNINGHAM G L, et al. Biological Feedbacks in Global Desertification[J]. *Science*, 1990, 247(4 946): 1 043-1 048.
- [44] 孙 茜, 贺 超, 贺学礼, 等. 沙冬青与伴生植物深色有隔内生真菌定殖规律及其与土壤因子的相关性[J]. 植物生态学报, 2015, 39(9): 878-889. SUN Q, HE C, HE X L, et al. Colonization of dark septate endophytes in roots of *Ammopiptanthus mongolicus* and its associated plants as influenced by soil properties[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 878-889.
- [45] 方海涛, 王黎元, 张晓刚. 珍稀濒危植物沙冬青花生物学研究[J]. 广西植物, 2004, (5): 478-480+431. FANG H T, WANG L Y, ZHANG X G. A study on flower biology of endangered plant *Ammopiptanthus mongolicus*[J]. *Guihaia*, 2004, (5): 478-480+431.
- [46] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, (4): 1 376-1 382. XIA Y Q, SHAO M A. The Sap flow dynamics of *Caragana korshinskii* and the influence of environmental factors in semi-arid region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, (4): 1 376-1 382.
- [47] 雷妮娅, 米湘成, 陈 勇, 等. 生态因子及其交互作用对拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)表型可塑性的影响[J]. 生态学报, 2008, (5): 1 949-1 958. LEI N Y, MI X C, CHEN Y, et al. Effects of the ecological factors and their interactions on the phenotypic plasticity of *Arabidopsis thaliana*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, (5): 1 949-1 958.