西鄂尔多斯霸王群落种内与种间的竞争关系

冯 婧，王铁娟，张 蕊，张冰冰，邵金玲
（内蒙古师范大学 生命科学与技术学院 内蒙古自治区高等学校
蒙古高原生物多样性保护与可持续利用重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022）

摘 要：［目的］探究西鄂尔多斯霸王（*Zygophyllum xanthoxylum*）受到的竞争压力以及群落中珍稀濒危植物和其他主要植物与霸王的竞争情况，为荒漠生态系统的保护与恢复提供科学参考。［方法］对西鄂尔多斯地区4个常见的霸王群落类型进行调查，利用Hegyi单木竞争指数模型分析种内与种间竞争情况。［结果］霸王＋矮脚锦鸡儿（*Caragana brachypoda*）群落、霸王＋绵刺（*Potaninia mongolica*）群落、霸王＋四合木（*Tetraena mongolica*）群落、霸王＋沙冬青（*Ammopiptanthus mongolicus*）群落中，种间竞争强度占总竞争强度的比例依次为85.07%，80.52%，88.76%和80.52%，说明霸王受到的竞争压力主要来源于种间。不同群落中霸王的竞争植物种类有一定差异。其中矮脚锦鸡儿、绵刺、白沙蒿（*Artemisia sphaerocephala*）、四合木、沙冬青、长叶红砂（*Reaumuria trigyna*）均相对霸王具有较强的竞争力。种间竞争、总竞争强度与霸王冠幅服从幂函数模型，且随着霸王冠幅的增大竞争指数不断下降。小冠幅霸王受到的竞争压力最大。［结论］Hegyi模型可较好地反映霸王受到的竞争状况，在4个霸王群落中，种间竞争均大于种内竞争。不同霸王群落的主要竞争植物具有一定差异。小冠幅霸王受到的竞争压力较强。关注霸王幼龄植株受到的竞争压力，辅以适当的人工措施，能够增强生态系统的稳定性。

关键词：霸王；种内竞争；种间竞争；竞争指数；西鄂尔多斯
文献标识码：A **文章编号：**1000-288X（2026）03-0097-10 **中图分类号：**Q948.15

文献参数：冯婧，王铁娟，张蕊，等.西鄂尔多斯霸王群落种内与种间的竞争关系[J].水土保持通报，2026，46（3）：97-106. Feng Jing, Wang Tiejuan, Zhang Rui, et al. Intraspecific and interspecific competitive relationship of *Zygophyllum xanthoxylum* community in western Ordos [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46(3)：97-106.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.032 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.03.032**

Intraspecific and interspecific competitive relationship of *Zygophyllum xanthoxylum* community in western Ordos

Feng Jing, Wang Tiejuan, Zhang Rui, Zhang Bingbing, Shao Jinling
（*College of Life Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization in Mongolian Plateau for College and University of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia* 010022, *China*）

Abstract: [Objective] The competitive pressure of *Zygophyllum xanthoxylum* in the western Ordos region, as well as the competition between *Z. xanthoxylum* and rare and endangered plants and other dominant species within the community, was investigated in order to provide a reference for the conservation and restoration of desert ecosystems. [Methods] Four common *Z. xanthoxylum* community types in western Ordos were investigated, and the intraspecific and interspecific competition were analyzed using the Hegyi individual-tree competition index model. [Results] The results showed that the interspecific competition intensity accounted for 85.07%, 80.52%, 88.76%, and 80.52% of the total competition intensity in the *Z. xanthoxylum* + *Caragana brachypoda* community, *Z. xanthoxylum* + *Potaninia mongolica* community, *Z. xanthoxylum* + *Tetraena mongolica* community, and *Z. xanthoxylum* + *Ammopiptanthus mongolicus* community, respectively, indicating

收稿日期：2025-11-05 **修回日期：**2025-12-10 **采用日期：**2025-12-12
资助项目：内蒙古自治区科技计划项目“西鄂尔多斯生物多样性调查与珍稀濒危植物保护现状研究”（2020GG0124）；内蒙古师范大学自主科研项目（KJJYZX2026087）
第一作者：冯婧（2000—），女（汉族），河北省张家口市人，硕士研究生，研究方向为植物生态学。Email：1529911568@qq.com。
通信作者：王铁娟（1969—），女（汉族），河北省任丘市人，博士，教授，主要从事植物生态学方面的研究。Email：wtj105@163.com。

that the competitive pressure on *Z. xanthoxylum* mainly came from interspecific competition. There were some differences in the competitive plant species of *Z. xanthoxylum* among different communities, *C. brachypoda*, *P. mongolica*, *Artemisia sphaerocephala*, *T. mongolica*, *A. mongolicus* and *Reaumuria trigyna* all had strong competitive effects on *Z. xanthoxylum*. The relationship between interspecific competition, total competition intensity, and the crown width of *Z. xanthoxylum* followed a power function model. With the increase of crown width, the competition index decreased continuously, and *Z. xanthoxylum* with smaller crown width experienced the greatest competitive pressure. [Conclusion] The Hegyi model can better reflect the competitive status of *Z. xanthoxylum*. In the four *Z. xanthoxylum* communities, interspecific competition is greater than intraspecific competition. The main competitive plant species differ among communities, and *Z. xanthoxylum* with smaller crown width experiences stronger competitive pressure. Paying attention to the competitive pressure on young plants of *Z. xanthoxylum*, supplemented by appropriate artificial measures, can enhance ecosystem stability.

Keywords: ***Zygophyllum xanthoxylum***; **intraspecific competition**; **interspecific competition**; **competition index**; **western Ordos**

竞争是生物自然选择的重要动力[1]。植物的竞争是有机体之间对有限环境资源的需求利用所引起的相互作用,制约竞争双方的生长和发育[2]。自然界中,竞争驱动着生物体的优胜劣汰,影响物种的生存、生长和繁殖,对揭示物种共存机制、探索生物生存策略具有不可替代的研究价值[3-4]。竞争的主要表现是植物个体的种内和种间竞争,经过长期相互作用,最终使得相邻植物在环境中达成相对稳定的利用资源最优生态位[5-6]。一般来说,植物的生态位越接近,竞争程度就会越激烈。竞争现象是自然群落中普遍存在的,由于竞争是决定群落组成、结构与动态的重要因素,因而受到了越来越多学者的关注。植物的竞争模型可以分为两类,即与距离无关的竞争模型和与距离有关的竞争模型。Hegyi单木竞争模型是与距离有关的模型,其直接使用对象木与竞争木之间的距离及竞争木与对象木的胸径之比来反映植物个体所承受的竞争压力,因其操作简单,应用较为广泛[7-9]。

霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)为蒺藜科驼蹄瓣属强旱生灌木,是古老的荒漠残遗植物[10]。可见于荒漠带和荒漠草原带,主要分布于内蒙古自治区中部和西部、宁夏回族自治区西北部、甘肃省河西走廊、青海省东部、新疆维吾尔自治区中部和西部以及蒙古国西部、南部和中亚东部[11]。霸王适合生长的生境主要以荒漠和半荒漠的沙砾质河流阶地、低山山坡、碎石低丘和山前平原为主,在戈壁覆沙地上常形成霸王群落[10]。其具有生长广泛的根系,对干旱、风沙环境具有较高的抵抗力,可保持水土[12]。霸王的枝叶富含多种营养成分且适口性好,具有显著的营养价值与饲用价值[11],凭借其自身独特的生态特性,霸王成为亚洲中部荒漠地带重要的特有植物。

西鄂尔多斯位于荒漠草原向草原化荒漠过渡地带,是中国干旱区极具特色的一个地区,地处中国“八大特有属多度中心”之一的南蒙古中心东部[13]。这里具有丰富的古地中海残遗植物和6种国家二级重点保护植物,成为研究亚洲干旱区生物多样性的关键地带[14]。由于地区的独特性,1997年成立西鄂尔多斯国家级自然保护区,保护古老残遗濒危植物和荒漠生态系统。该地区由灌木、半灌木建群的群系类型多样[15],但由于水分匮乏,土壤养分贫瘠,各群系随着小生境资源的不同不断发生着空间替代,呈小斑块状交错分布。不同群系的建群种又可形成共优群落,或成为其他群系的亚优势种或伴生种。不同群系的斑块镶嵌分布以及同种植物的群落成员型转变,反映了这些植物间的竞争和生态位分化。霸王群落(群系)是西鄂尔多斯地区分布最广泛的群落类型之一,目前对霸王的竞争研究尚未见报道。霸王与其他灌木、半灌木群落作用明显,尤其是与绵刺(*Potaninia mongolica*)、四合木(*Tetraena mongolica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)和矮脚锦鸡儿(*Caragana brachypoda*)等建群的灌木群落。绵刺、四合木和沙冬青均是分布于我国西北荒漠区的国家二级重点保护植物,霸王与它们的种间关系如何?是否存在明显的竞争?种间关系受到哪些因素影响?这些是本研究关注的问题。以往对于植物的竞争关系研究往往只针对一个群落,本研究在西鄂尔多斯地区选取4种常见的霸王群落类型,可以在更广的范围探讨霸王与其他种的关系,通过不同群落的印证与补充,更为全面地反映霸王受到的竞争情况以及与主要荒漠植物间的相互作用。脆弱生态系统对气候变化尤为敏感,特别体现在种间关系上,而目前对于荒漠植被中植物间的竞争鲜有报

道,因而研究西鄂尔多斯地区植物的竞争关系,对探究该地区优势物种间生态位分化,及时了解种群和群落的动态,提出有效的生物多样性和濒危植物的保护策略具有重要的科学意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于西鄂尔多斯,该区域是鄂尔多斯高原西缘至黄河东岸的狭长地带,包括内蒙古鄂尔多斯市的鄂托克旗西部、杭锦旗西南部以及乌海市,属于典型的温带大陆性季风气候,年平均气温为 6.17～8.56 ℃,年均降水量为 162～245 mm,日照长,温差大。

本研究于2024年9月在西鄂尔多斯草原化荒漠区调查了4个霸王占优势但次优势的灌木明显不同的群落,在每个群落内分别设置样地,样地具体情况详见表1。霸王＋矮脚锦鸡儿群落(样地ZC)地势微起伏,覆沙地,霸王生长状况较好,群落中小灌木层片较发达,以矮脚锦鸡儿占优势;霸王＋绵刺群落(样地ZP)为沙砾质平原,群落中小灌木绵刺占有较大优势;霸王＋四合木群落(样地ZT)地势平坦,地表覆沙具砾石,灌木四合木也具有较大优势;霸王＋沙冬青群落(样地ZA)为沙地,在该群落内除霸王外,灌木沙冬青也具有一定的优势,半灌木层片发育良好,其中白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)的个体数量占据显著优势,成为该层的优势种。

表1　竞争样地基本信息

Table 1　Basic information of competition plots

群落类型	样地编号	地点	经度	纬度	海拔高度/m
霸王＋矮脚锦鸡儿群落	ZC	鄂尔多斯市杭锦旗巴拉贡	107°15′27.50″E	40°13′59.10″N	1 241.1
霸王＋绵刺群落	ZP	鄂尔多斯市鄂托克旗碱柜村	106°45′51.55″E	39°56′12.43″N	1 100.6
霸王＋四合木群落	ZT	鄂尔多斯市杭锦旗巴拉贡	107°11′5.41″E	40°15′45.51″N	1 151.8
霸王＋沙冬青群落	ZA	乌海市海勃湾区千里山镇	106°51′10.06″E	39°50′29.67″N	1 198.3

1.2　调查方法

由于西鄂尔多斯地区灌木荒漠均呈斑块分布,面积不大,为了对样地间进行比较,参考最小的样地面积,在每个样地划定 80 m×30 m 的范围,沿长度方向拉3条样线,在每条样线上间隔 8 m 左右随机选取霸王(冠幅＞0.05 m)作为对象木,每条样线选取10株霸王,每个样地共计30株。以每株对象木的中心为圆心画样圆,基于野外调查发现,样地内的霸王和其他竞争植物的平均冠幅不超过 3 m,因此以 3 m 作为样圆半径。记录每个样圆内对象木和所有竞争植物(包括冠幅＞0.05 m 的灌木和半灌木)个体的种名、冠幅以及对象木与每个竞争植物个体间的距离。

1.3　数据处理

本研究利用Hegyi竞争指数模型分析霸王种内、种间竞争关系,该模型针对乔木采用胸径作为参数计算竞争指数,对于非乔木可采用冠幅、高度、基径等参数[16-18]。霸王为灌木,因而本研究采用冠幅作为参数进行计算。竞争强度大小用竞争指数I_c表示,其计算公式[19]为

$$I_C=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{K}(B_j/B_i)\times\frac{1}{L_{ij}} \tag{1}$$

式中:I_c为竞争指数;N为对象木的株数;K为竞争木的株数;B_i为对象木的冠幅;B_j为竞争木植物的冠幅;L_{ij}为对象木与竞争植物之间的距离。

2　结果与分析

2.1　不同霸王群落种内与种间竞争强度

在4个不同霸王群落中,根据对象木的冠幅范围,以 0.3 m 为间隔,将霸王对象木分为4个冠幅级,具体情况详见表2。调查时发现霸王＋矮脚锦鸡儿群落(ZC)中霸王的冠幅较大,所以设定最小冠幅级为≤0.9 m,最大冠幅级为＞1.5 m;其他3个群落最小冠幅级为≤0.6 m,最大冠幅级为＞1.2 m。ZC群落中最小冠幅级(≤0.9 m)和最大冠幅级(＞1.5 m)个体数量不多,各有3株;在(0.9,1.2] m和(1.2,1.5] m范围内个体数量最多,分别为11,13株。其他3个群落个体分布情况有所不同,其中在霸王＋绵刺群落(ZP)中,冠幅级在(0.6,0.9] m个体数量最多,为12株,≤0.6 m次之,有10株,最大冠幅级(＞1.2 m)仅1株,反映出群落中霸王个体总体偏小;而在霸王＋四合木群落(ZT)和霸王＋沙冬青群落(ZA)中,(0.6,0.9] m个体数量明显多,分别为13株和17株,其他冠幅级个体数均≤5。各群落霸王受到的竞争情况详见表2。

由表2可知,霸王＋矮脚锦鸡儿群落(ZC)、霸王＋绵刺群落(ZP)、霸王＋四合木群落(ZT)、霸王＋沙冬青群落(ZA)中霸王的总竞争指数分别为216.44,202.29,235.40和206.60,其中ZT霸王所受

到的总竞争压力最大,ZC其次。具体而言,4种群落中,30株对象木均存在种间竞争,而存在种内竞争的对象木株数有所不同,ZC, ZP, ZT, ZA群落中分别为28,30,25和29株;种间竞争强度与占总竞争强度的比例依次分别为184.13(占85.07%),162.89(占80.52%),208.94(占88.76%),166.36(占80.52%),反映出种间竞争占明显优势,且以ZT群落种间竞争强度最大、ZC其次。不同冠幅级的霸王所受到的竞争压力不同,总体来讲,小冠幅级霸王受到的竞争压力较大,除ZC群落外,ZP群落在≤0.6 m, ZT和ZA群落在(0.6,0.9] m冠幅级的总竞争指数最高,分别为116.60,113.82和144.02,占各自总竞争指数的57.64%,48.35%和69.71%。各冠幅级的总竞争指数与该冠幅级的个体数量有关,平均竞争指数则可以反映每个对象木受到的竞争情况,从4个群落种内、种间和总体竞争的平均竞争指数来看,基本呈随冠幅级增大平均竞争指数减少的趋势,反映出小个体受到更强的竞争。

表2 不同冠幅级霸王的种内与种间竞争强度

Table 2 Intraspecific and interspecific competition intensity of *Zygophyllum xanthoxylum* across different crown width classes

样地编号	冠幅级/m	种内竞争				种间竞争				总体竞争			
		对象木株数	竞争植物株数	竞争指数I_c	平均竞争指数	对象木株数	竞争植物株数	竞争指数I_c	平均竞争指数	对象木株数	竞争植物株数	竞争指数I_c	平均竞争指数
ZC	≤0.9	3	7	3.48	1.16	3	99	40.31	13.44	3	106	43.79	14.60
	(0.9,1.2]	11	37	14.86	1.35	11	249	66.01	6.00	11	286	80.88	7.35
	(1.2,1.5]	12	30	11.49	0.96	13	354	69.11	5.32	13	384	80.60	6.20
	>1.5	2	8	2.48	1.24	3	65	8.70	2.90	3	73	11.17	3.72
	总计(均值)	28	82	32.31	1.15	30	767	184.13	6.14	30	849	216.44	7.21
ZP	≤0.6	10	26	20.94	2.09	10	232	95.66	9.57	10	258	116.60	11.66
	(0.6,0.9]	12	27	12.58	1.05	12	226	45.82	3.82	12	253	58.39	4.87
	(0.9,1.2]	7	16	5.64	0.81	7	145	18.98	2.71	7	161	24.62	3.52
	>1.2	1	1	0.24	0.24	1	29	2.44	2.44	1	30	2.67	2.67
	总计(均值)	30	70	39.39	1.31	30	632	162.89	5.43	30	702	202.29	6.74
ZT	≤0.6	5	9	7.07	1.41	5	136	51.27	10.25	5	145	58.35	11.67
	(0.6,0.9]	13	29	15.44	1.19	13	379	98.38	7.57	13	408	113.82	8.76
	(0.9,1.2]	5	10	2.71	0.54	8	247	45.47	5.68	8	257	48.18	6.02
	>1.2	2	4	1.24	0.62	4	126	13.81	3.45	4	130	15.05	3.76
	总计(均值)	25	52	26.46	1.06	30	888	208.94	6.96	30	940	235.40	7.85
ZA	≤0.6	4	9	8.87	2.22	4	51	29.62	7.41	4	60	38.49	9.62
	(0.6,0.9]	17	52	25.59	1.51	18	279	118.43	6.58	18	331	144.02	8.00
	(0.9,1.2]	3	8	2.74	0.91	3	27	4.54	1.51	3	35	7.28	2.43
	>1.2	5	12	3.04	0.61	5	61	13.77	2.75	5	73	16.81	3.36
	总计(均值)	29	81	40.24	1.39	30	418	166.36	5.55	30	499	206.60	6.89

注:不同编号样地群落类型见表1。下同。

2.2 不同种类竞争植物的竞争强度

在4个不同的霸王群落中,霸王受到了自身以及其他不同种类植物的竞争情况详见表3。霸王的种内竞争强度在霸王+四合木(ZT)群落中位于第4位,在其他3个群落中均位于第2位,且霸王在各群落中的平均竞争指数也较高,说明霸王对自身存在着一定的竞争。

在霸王+矮脚锦鸡儿(ZC)、霸王+绵刺(ZP)、霸王+四合木(ZT)、霸王+沙冬青(ZA)群落中,其他竞争植物分别有9种(849株),6种(702株),7种(940株),6种(499株)。ZC群落中,小灌木矮脚锦鸡儿是群落的亚优势种,个体较小数量多,竞争指数大,为132.63(占61.28%),对霸王产生较大的竞争压力,是该群落中霸王的主要竞争植物,小灌木长叶红砂(*Reaumuria trigyna*)与绵刺、半灌木驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)也对霸王产生一定程度的竞争,竞争指数分别为16.16,16.03,12.75;在ZP群落中,绵刺作为群落中的亚优势种,对霸王产生的竞争压力最大,为136.01(占67.24%),成为该群落中霸王的主要竞争对象,个体小数量最多。除绵刺和霸王外,灌木四合木位于第3,对霸王的竞争指数为19.50,其他竞争植物对霸王产生的竞争影响较小;

ZT群落中矮脚锦鸡儿因数量多成为霸王的主要竞争者,竞争指数为77.53(占32.93%),四合木、长叶红砂也对霸王存在一定的竞争,其中四合木作为群落的亚优势种,对霸王的影响仅次于矮脚锦鸡儿,竞争指数为45.64(占19.39%);在ZA群落中,半灌木层片的白沙蒿数量较多,竞争强度为134.87(占65.28%),成为霸王的主要竞争植物,沙冬青是灌木层片的亚优势种,竞争强度为24.15(占11.69%),处于第3位,其他竞争植物对霸王产生的竞争影响较小。从4个群落中霸王的竞争植物情况可以看出,矮脚锦鸡儿是ZC, ZT群落的主要竞争植物,绵刺、白沙蒿分别是ZP, ZA群落的主要竞争植物。在各群落中平均竞争指数最大的植物依次是霸王(ZC群落)、四合木(ZP, ZT群落)、沙冬青(ZA群落),与这些植物的个体较大有关。其他植物,如戈壁天门冬(*Asparagus gobicus*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)和白刺(*Nitraria tangutorum*)由于个体小或数量少,均对霸王产生较小的竞争压力。

表3　霸王竞争植物组成与竞争指数

Table 3　Composition of competitive plants and competition index of *Z. xanthoxylum*

样地	种名	株数	占总株数比例/%	平均冠幅/m	竞争指数I_c	占总强度比例/%	平均竞争指数	竞争指数排名
ZC	矮脚锦鸡儿	485	57.13	0.35	132.63	61.28	0.27	Ⅰ
	霸王	82	9.66	1.04	32.31	14.93	0.39	Ⅱ
	长叶红砂	78	9.19	0.37	16.16	7.47	0.21	Ⅲ
	绵刺	110	12.96	0.27	16.03	7.41	0.15	Ⅳ
	驼绒藜	37	4.36	0.50	12.75	5.89	0.34	Ⅴ
	戈壁天门冬	49	5.77	0.16	4.59	2.12	0.09	Ⅵ
	四合木	4	0.47	0.88	1.27	0.59	0.32	Ⅶ
	红砂	3	0.35	0.39	0.61	0.28	0.20	Ⅷ
	猫头刺	1	0.12	0.16	0.08	0.04	0.08	Ⅸ
	合计	849	100		216.44	100		
ZP	绵刺	587	83.62	0.23	136.01	67.24	0.23	Ⅰ
	霸王	70	9.97	0.75	39.39	19.47	0.56	Ⅱ
	四合木	10	1.42	0.76	19.50	9.64	1.95	Ⅲ
	白刺	31	4.42	0.26	6.50	3.21	0.21	Ⅳ
	红砂	3	0.43	0.56	0.79	0.39	0.26	Ⅴ
	戈壁天门冬	1	0.14	0.14	0.09	0.04	0.09	Ⅵ
	合计	702	100		202.29	100		
ZT	矮脚锦鸡儿	348	37.02	0.19	77.53	32.93	0.22	Ⅰ
	四合木	56	5.96	0.81	45.64	19.39	0.81	Ⅱ
	长叶红砂	180	19.15	0.29	39.94	16.96	0.22	Ⅲ
	霸王	52	5.53	0.67	26.46	11.24	0.51	Ⅳ
	戈壁天门冬	256	27.23	0.10	23.10	9.81	0.09	Ⅴ
	驼绒藜	28	2.98	0.29	17.48	7.43	0.62	Ⅵ
	绵刺	20	2.13	0.38	5.27	2.24	0.26	Ⅶ
	合计	940	100		235.40	100		
ZA	白沙蒿	313	62.73	0.53	134.87	65.28	0.43	Ⅰ
	霸王	81	16.23	0.75	40.24	19.48	0.50	Ⅱ
	沙冬青	32	6.41	1.04	24.15	11.69	0.75	Ⅲ
	猫头刺	61	12.22	0.13	5.85	2.83	0.10	Ⅳ
	戈壁天门冬	10	2.00	0.11	0.78	0.38	0.08	Ⅴ
	白刺	2	0.40	0.55	0.70	0.34	0.35	Ⅵ
	合计	499	100		206.60	100		

2.3　对象木霸王冠幅与竞争强度的关系及预测

植物的竞争能力受到生态需求、生态幅度、发育阶段以及个体大小等诸多因素的影响,其中植物个体大小对竞争能力影响很大[20]。本文以对象木冠幅为自变量,竞争指数为因变量作散点图,运用多种数学模型对冠幅和竞争指数进行拟合回归分析。拟合结

果发现,群落中霸王种间竞争、总竞争指数与冠幅的关系近似服从幂函数,且相关系数均达到了极显著水平($p<0.01$),说明幂函数可以用来预测霸王种群的总竞争与种间竞争强度。但各群落种内竞争指数与霸王冠幅的相关性均不显著,与参与种内竞争的个体数量较少有关。由于4个霸王群落以种间竞争为主,因此各群落种间竞争(图1)与总体竞争(图2)的曲线图的趋势高度一致。总体来看,竞争指数随着霸王冠幅的增大而下降,小冠幅级霸王受到的竞争压迫大,处于竞争最为剧烈的阶段,到达中等级后受到的竞争逐渐降低,ZC群落在霸王冠幅>1.5 m时、其他3个群落中在霸王冠幅>1.0 m时,竞争指数逐渐趋于平稳。

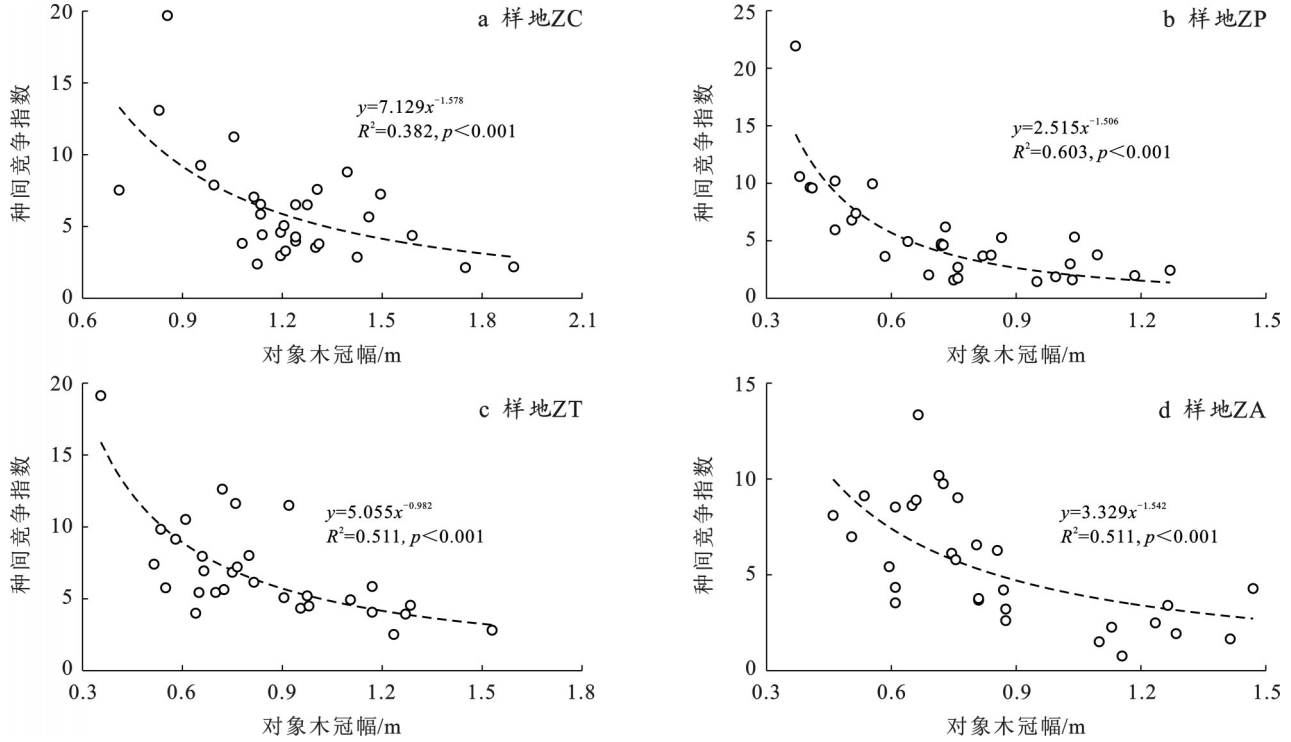


图1 不同霸王群落对象木冠幅与种间竞争指数关系

Fig.1 Relationship between crown width and interspecific competition index of target trees in different *Z. xanthoxylum* communities

3 讨 论

共同生活在同一个群落中的植物总会发生相互作用。如果某种植物的资源利用范围较窄,当其个体密度增大时,激烈的种内竞争会产生自疏作用,其结果会降低个体密度且拓宽植物的资源利用范围,但当范围扩大时,不同物种的资源利用重叠加大,又会加剧种间竞争,竞争的结果会导致物种生态位的分化,从而更充分地利用资源。资源动态的差异是理解干旱生态系统中植物相互作用的核心[21],随着资源的变化植物会调整种内与种间竞争强度而达到新的平衡,而植物竞争关系的变化又会影响植物间资源的分配,形成负反馈式的调节。植物竞争主要表现为植株对地上光资源的竞争和对地下土壤水分和养分的竞争。在荒漠地区,日照强度大,植物较为稀疏,因而光照不会成为植物生长的限制因子,但降水匮乏,植物间的竞争主要是对水资源的竞争,故植物往往具有发达的根系,能够从更深更广的土层中吸收水分,尤其是灌木与半灌木。虽然地下根系情况不易运用到竞争模型中,但灌木、半灌木的植株大小常与根系大小呈正相关,因而基于距离的Hegyi单木竞争指数模型也可以客观反映荒漠植物间的竞争情况。

目前对植物竞争的研究多集中于濒危植物,也有部分研究选择群落的重要物种开展[2,22-23]。霸王荒漠是我国荒漠区广泛分布的群系之一,本研究在西鄂尔多斯地区调查了最为常见的4种类型,通过Hegyi单木竞争指数模型很好地揭示了各群落中霸王受到的种内竞争与种间竞争情况。结果显示4种群落中霸王个体分布松散,能够有效地减缓种内竞争,种内竞争强度在26.46~40.24,而各群落竞争植物或数量多密度较大,或单株个体大,使得霸王种间竞争远大于种内竞争,研究结果显示,种间竞争强度在162.89~208.94,各群落的种间竞争强度是种内竞争强度的4倍以上。

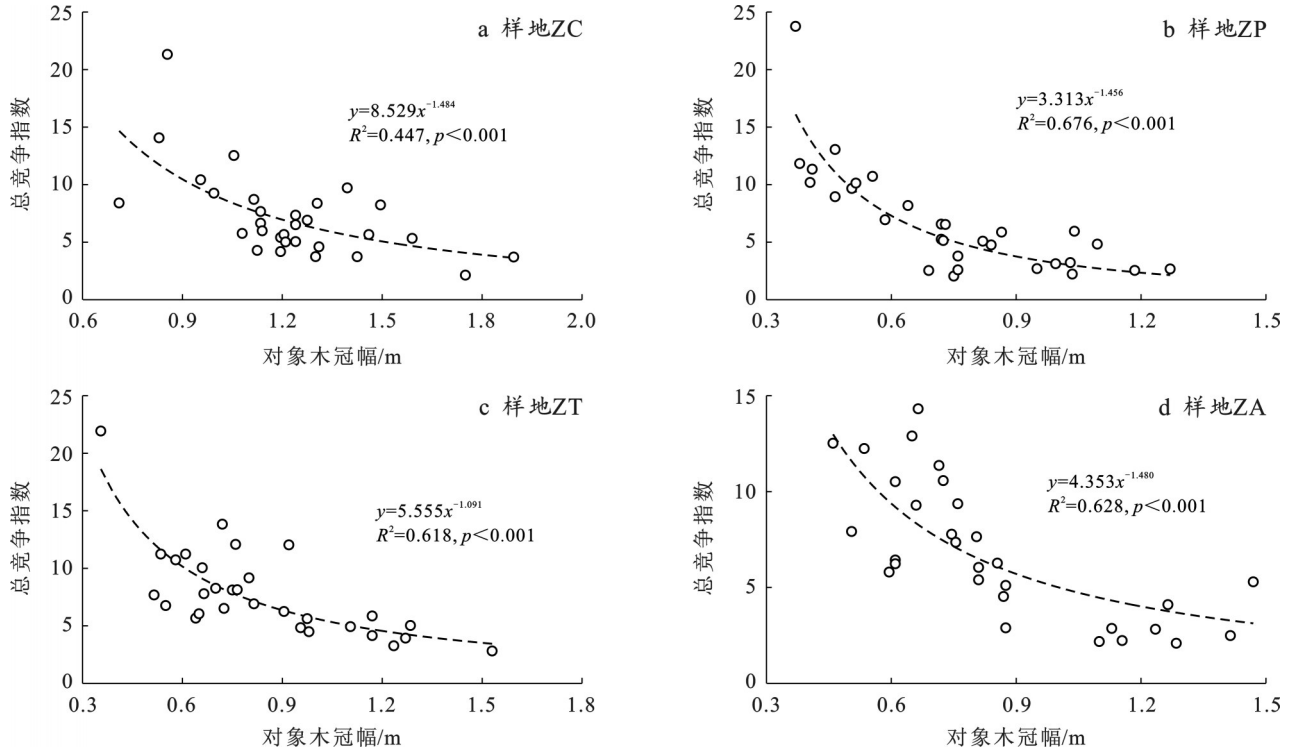


图 2　不同霸王群落对象木冠幅与总竞争指数关系

Fig.2　Relationship between crown width and total competition index of target trees in different *Z. xanthoxylum* communities

矮脚锦鸡儿、绵刺、白沙蒿对霸王的竞争强度大,是霸王群落中常见的亚优势种或伴生种。矮脚锦鸡儿与绵刺为小灌木,位于霸王群落的下层,研究样地矮脚锦鸡儿的株高多数在 20～40 cm,绵刺株高则多数不足 20 cm,根据万志强等[24]的研究,两种植物根系生物量 90% 以上分布于 0—20 cm 的土层中;白沙蒿为半灌木,种子繁殖能力强,虽然成株高度多在 50 cm 以上,但群落中幼小植株比例高,根据周志宇等[25]的研究,白沙蒿成株根系生物量 65%～80% 分布于 0—20 cm 的土层中。因而 3 种竞争植物均主要利用浅层的土壤水分。在调查的群落中,霸王株高多数在 50～70 cm。根据张永明等[26]的研究,霸王的根系生物量约 17% 分布在 0—20 cm 的土层中,55% 左右分布在 20—60 cm,20% 左右分布在 60—80 cm。因而不论从地上还是地下的垂直结构,3 种主要竞争植物均与霸王位于不同的层次,反映出竞争导致的生态位分化。荒漠地区降水少,波动性大,土壤水分会随着植物吸收、蒸发和深层渗漏而变化。当单次降水量较少时,土壤浅层的根系优先吸水。对于两种小灌木矮脚锦鸡儿和绵刺,单株的竞争能力较弱,但群落中密度大,利用土壤浅层水分不断增加个体数量,通过群体效应得以在竞争中共存。但荒漠区水分蒸发量大,当干旱来临时,土壤表层水分散失明显,导致小灌木以休眠的方式躲避干旱,尤其是绵刺,在生长季出现多次休眠,具有明显的避旱机制[27]。半灌木白沙蒿与前两种小灌木不同,其种子繁殖能力强,雨水好的年份,群落中有大量实生苗,但遇到干旱,幼小植株大量死亡,存活的成株耐旱性强,成为群落的主要竞争者。3 种植物对干旱适应的动态调整,会影响到土壤水分的利用,进而影响霸王的生长。

四合木与沙冬青个体较大,根系较深,对霸王的平均竞争指数大,反映了两种植物的单株竞争能力强。在研究区四合木与霸王相伴出现的群落最为常见,尤其在地势平坦且地表具砾石的覆沙地中,沙冬青则喜生于沙地或覆沙较厚的沙砾质地,在这样的生境中,与霸王伴生形成一些小群落。四合木与霸王个体大小较为接近,平均株高在不同生境具有较大变化,在调查的群落中,四合木成株高度多数在 40～60 cm,低于霸王。张永明等[26]的研究显示,四合木的根系生物量近 30% 分布在 0—20 cm 的土层中,约 53% 分布在 20—60 cm,约 17% 分布在 60—80 cm,浅层土的根量高于霸王(约 17%),霸王根系更深。沙冬青的植株较为高大,研究样地沙冬青成株高度多数在 70 cm 以上,最高可达 122 cm,且株丛大。沙冬青根系生物量约 43% 分布在 20—60 cm 的土层中,20% 左右分布在 60—80 cm,27% 左右分布在 80—160 cm,0—20 cm 的土层中没有侧根[26],具有更深的

根系。当生长区单次降水量较大时,沙地或沙砾质地水分下渗能力强,下渗到土壤深层的水分不似表层土中的水分易蒸发,能够保持较长的时间,有利于深根系植物对水分的利用,但深层水分有效供给量不足以维持太多的植物个体,因而像霸王、四合木、沙冬青等较深根系的植物在自疏与他疏的作用下,密度较低。其中四合木与霸王相比,虽然四合木略矮、根系也略浅,但两种植物处于群落相近的地上、地下垂直分层中,因而资源利用的相似性较高,竞争也较明显,而沙冬青有着更大的冠幅和更深的根系,个体竞争能力强。竞争的结果导致由四合木与霸王、沙冬青与霸王的共优群落形成各自的单优群落,共优群落与各自单优的群落呈斑块相间毗邻分布,其中四合木与霸王的不同组合类型在研究区分布最为广泛,沙冬青与霸王的不同组合类型主要出现在沙地,体现了对环境的综合适应。

多项研究[9,28-30]显示,竞争指数与对象木个体的大小存在显著负相关关系,植物个体越大,受到的竞争压力越小,且符合幂函数模型。本研究中,对象木冠幅与种间竞争、总竞争指数的关系也服从幂函数,且达到极显著水平,说明4个霸王群落中竞争指数均随着冠幅的增加呈现出降低的趋势。由种间竞争(图1)与总体竞争(图2)的曲线图可以看出,小冠幅级的霸王所受到的竞争最为激烈。幼小植株对资源的竞争能力相对较弱,对于霸王的幼株而言,由于利用土壤浅层的水分与养分,与高密度的矮脚锦鸡儿、绵刺、白沙蒿有着相近的生态位,受到的竞争压力明显大,由表2的小冠幅级霸王的平均竞争指数明显大也可反映这个特点。从调查的数据看,4个群落中不论是作为对象木还是竞争木的霸王,小株均很少,说明霸王种群的更新受到一定限制,与霸王小株受到明显的竞争排斥也有一定的关系。随着霸王的生长,在群落中具有一定的优势,对资源利用能力不断增强,受到的竞争压力逐渐减弱,最后趋于稳定。

西鄂尔多斯地区灌木荒漠类型多样,呈斑块状交错分布,本研究中霸王的主要竞争植物四合木、沙冬青、白沙蒿、矮脚锦鸡儿、绵刺也均可成为群落的建群种,因而在霸王群落中这些植物与霸王的关系处于动态的变化中。霸王群落作为西鄂尔多斯最主要的群落类型,对于维持荒漠生态系统的稳定具有重要的意义。在我们近几年的考察中发现,降水在年际间或季节间的波动对霸王影响明显,干旱常使返青的霸王枝叶变黄或死亡,在有限的降水条件下,植物间的竞争又加剧了干旱的胁迫。因而应关注霸王群落的动态变化,特别注意幼株的生长状况,当种群更新受到较大影响时,在对竞争植物不产生较大干扰的情况下,适当去除霸王幼株附近部分密度大的竞争者,以降低对幼株的竞争压力,保持其良好的种群结构。同时还需要特别关注与霸王竞争的濒危植物四合木、绵刺、沙冬青的生长情况,结合局部环境特征,科学评价群落结构和发育状况,从而维护荒漠生态系统的稳定并对濒危植物进行科学地监测和保护。

4 结 论

霸王受到种间竞争远大于种内竞争,不同霸王群落的主要竞争植物具有一定的差异性。矮脚锦鸡儿、绵刺、白沙蒿、长叶红砂个体数量多,群体竞争能力强,四合木、沙冬青个体大,单株竞争能力强,均是霸王的主要竞争者。4个霸王群落中幼小霸王个体数少,种群更新受到一定限制,同时种间竞争指数和总竞争指数均与霸王冠幅服从幂函数模型,幼小霸王个体承受的竞争压力较大。随着霸王冠幅的增大竞争强度不断下降,多数群落中,当霸王冠幅大于1.0 m时竞争强度渐趋平稳。适当实施人工抚育措施,调节霸王种群的结构和群落的种类组成比例,减轻竞争压力,可维持霸王荒漠的可持续发展。

参考文献(References)

[1] 王平,王天慧,周道玮,等.植物地上竞争与地下竞争研究进展[J].生态学报,2007,27(8):3489-3499.
Wang Ping, Wang Tianhui, Zhou Daowei, et al. A literature review on the above and below-ground competition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(8):3489-3499.

[2] 孙嘉男,王孝安,郭华,等.黄土高原柴松群落优势乔木树种的竞争关系[J].生态学杂志,2010,29(11):2162-2167.
Sun Jianan, Wang Xiaoan, Guo Hua, et al. Competitive relationships of dominant tree species in *Pinus tabulaefirmis* f.*shekanensis* community on Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010,29(11):2162-2167.

[3] Maleki K, Kiviste A, Korjus H. Analysis of individual tree competition on diameter growth of silver birch in Estonia [J]. Forest Systems, 2015,24(2):e023.

[4] Weiner J. Asymmetric competition in plant populations [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1990, 5(11): 360-364.

[5] 刘德浩,陈智涛,舒夏竺,等.极小种群植物博罗红豆的种内和种间竞争[J].林业科技,2024,49(4):14-18.
Liu Dehao, Chen Zhitao, Shu Xiazhu, et al. Interaspecific and intraspecific competitions of *Ormosia boluoensis* with extremely small population [J]. Forestry Science & Technology, 2024,49(4):14-18.

[6] 童建明,马立荣.福寿林场杉木混交林种内、种间竞争研究[J].中南林业调查规划,2020,39(2):44-50.
Tong Jianming, Ma Lirong. Study on intraspecific and interspecific competition of *Cunninghamia lanceolata* mixed forest in Fushou forest farm [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2020,39(2):44-50.

[7] Zhang Yanyan, Zhang Ershan, Xia Jihui, et al. Elevation-dependent variations in interspecific and intraspecific relationships of *Quercus variabili*s natural secondary forests [J]. Journal of Plant Ecology, 2025,18(3):rtaf037.

[8] 周泽宇,周超凡,胡兴国,等.基于距离相关Hegyi指数的云冷杉天然林单木胸径生长模型[J].北京林业大学学报,2023,45(10):59-69.
Zhou Zeyu, Zhou Chaofan, Hu Xingguo, et al. Single tree DBH growth model of spruce-fir natural forest based on distance related Hegyi index [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(10):59-69.

[9] Chen Lijun, Jiang Wenqiang, Geng Yuepan, et al. Intra- and interspecific competition of endangered plant *Tetracentron sinense* Oliv [J]. Pakistan Journal of Botany, 2022,54(5):1903-1908.

[10] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队.内蒙古植被[M].北京:科学出版社,1985.
Inner Mongolia and Ningxia Scientific Expedition Group, Chinese Academy of Sciences. Vegetation in Inner Mongolia [M]. Beijing: Science Press, 1985.

[11] 赵一之,赵利清,曹瑞.内蒙古植物志[M].3版.呼和浩特:内蒙古人民出版社,2019.
Zhao Yizhi, Zhao Liqing, Cao Rui. Flora intramongolica [M]. 3rd ed. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolian People's Publishing House,2019.

[12] 李映坤,李锦荣,董雷,等.乌兰布和沙漠周边典型植物群落防风阻沙效果[J].中国沙漠,2022,42(6):65-73.
Li Yingkun, Li Jinrong, Dong Lei, et al. The wind and sand resistance effect of four vegetation types in Ulan Buhe Desert [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(6):65-73.

[13] 王荷生,张镱锂.中国种子植物特有属的生物多样性和特征[J].云南植物研究,1994(3):209-220.
Wang Hesheng, Zhang Yili. The bio-diversity and characters of spermatophytic genera endemic to China [J]. Acta Botanica Yunnanica, 1994(3):209-220.

[14] 韩秀珍,马建文,布和敖斯尔,等.利用卫星ETM与样方统计数据研究西鄂尔多斯珍稀濒危植物种群分布规律[J].遥感学报,2002,6(2):136-141.
Han Xiuzhen, Ma Jianwen, Buhe Aosier, et al. The application of ETM and sample sites statistic data to study the distribution pattern of endangered rare plants in west Ordos Plateau [J]. Journal of Remote Sensing, 2002,6(2):136-141.

[15] 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 Le, Zhao Liqing, Chen Yu, et al. Plant community diversity of steppification desert in west Ordos [J]. Arid Zone Research, 2015,32(2):258-265.

[16] 刘瑞,李毅,刘世增,等.干旱区油蒿种群种内竞争研究[J].中国农学通报,2013,29(10):51-57.
Liu Rui, Li Yi, Liu Shizeng, et al. Analysis on intraspecific competition of *Artermisia ordosic*a population in arid regions [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013,29(10):51-57.

[17] 林建勇,李娟,梁瑞龙.灌木层的叉叶苏铁种内和种间竞争[J].森林与环境学报,2019,39(2):159-164.
Lin Jianyong, Li Juan, Liang Ruilong. Intraspecific and interspecific competition of *Cycas micholitzii* in the shrub layer [J]. Journal of Forest and Environment, 2019,39(2):159-164.

[18] 刘虹佑,马燕,吴其超,等.濒危植物泰山柳种内与种间的竞争关系[J].森林与环境学报,2020,40(2):178-183.
Liu Hongyou, Ma Yan, Wu Qichao, et al. Intraspecific and interspecific competition of the endangered plant *Salix taishanensis* [J]. Journal of Forest and Environment, 2020,40(2):178-183.

[19] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands simulation[J]. Royalcoll, 1974,30:74-90.

[20] 张池,黄忠良,李炯,等.黄果厚壳桂种内与种间竞争的数量关系[J].应用生态学报,2006,17(1):22-26.
Zhang Chi, Huang Zhongliang, Li Jiong, et al. Quantitative relationships of intra-and interspecific competition in *Cryptocarya concinna* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(1):22-26.

[21] Aguiar M R, Lauenroth W K, Peters D P. Intensity of intra and interspecific competition in coexisting short-grass species [J]. Journal of Ecology, 2001, 89(1): 40-47.

[22] 张浩,刘万生,王彦琦,等.东北三大硬阔种内和种间竞争关系[J].植物研究,2024,44(6):870-878.
Zhang Hao, Liu Wansheng, Wang Yanqi, et al. Intraspecific and interspecific competitions of the three hardwood tree species in northeast China [J]. Bulletin of Botanical Research, 2024,44(6):870-878.

[23] 徐铭,柴宗政,孙彩丽,等.喀斯特次生林优势种群竞争关系[J].林草资源研究,2024(4):29-38.
Xu Ming, Chai Zongzheng, Sun Caili, et al. Competitive relationship between dominant populations of karst secondary forests [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(4):29-38.

[24] 万志强,杨九艳,高峰.西鄂尔多斯绵刺(*Potaninia*

mongolica)和短脚锦鸡儿(*Caragana brachypoda*)根系特征对土壤水分的响应[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2014,45(5):520-525.
Wan Zhiqiang, Yang Jiuyan, Gao Feng. Response of root characteristics of *Potaninia mongolica* and *Caragana brachypoda* in west Ordos to soil moisture [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2014,45(5):520-525.

[25] 周志宇,李锋瑞,陈亚明,等.阿拉善荒漠不同密度白沙蒿人工种群生长、繁殖与土壤水分的关系[J].生态学报,2004,24(5):895-899.
Zhou Zhiyu, Li Fengrui, Chen Yaming, et al. Growth and reproduction and their relationships with soil moisture in artificially established *Artemisia sphaerocephala* populations of different densities in the Alxa Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(5):895-899.

[26] 张永明,高润宏,金洪.西鄂尔多斯荒漠四种灌木根系生态特性研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2005,26(3):39-43.
Zhang Yongming, Gao Runhong, Jin Hong. Studies on the ecological characteristics of four bushes roots in desert of west Erdos [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2005,26(3):39-43.

[27] 刘果厚,贺晓,田靖,等.绵刺的生物学特性及其保护[J].西北植物学报,2000,20(1):123-127.
Liu Guohou, He Xiao, Tian Jing, et al. The biological characters and protection of *Potaninia mongolica* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(1):123-127.

[28] Xie Chunping, Liu Dawei, Huang Chenyang, et al. Study on the intraspecific and interspecific competition of *Pseudolarix amabilis* in Changxing County, Zhejiang Province [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021,30(4):3317-3325.

[29] 张称称,林国江,徐佳文,等.濒危植物华木莲的种内和种间竞争[J].东北林业大学学报,2024,52(12):40-45.
Zhang Chengcheng, Lin Guojiang, Xu Jiawen, et al. The intraspecific and interspecific competition of the endangered plant *Sinomanglietia glauca* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024,52(12):40-45.

[30] Ji Yingrui, Zhang Peng, Shen Hailong. Competition intensity affects growing season nutrient dynamics in Korean pine trees and their microhabitat soil in mixed forest [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 539:121018.

(上接第63页)

[27] 鲍平安,季波,孙果,等.光伏电站建设对植物群落与土壤特征的影响[J].草业学报,2024,33(12):23-33.
Bao Ping'an, Ji Bo, Sun Guo, et al. Effects of photovoltaic power station construction on plant community and soil characteristics [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024,33(12):23-33.

[28] 刘腾,马瑞,田永胜,等.阻沙固沙带土壤生态化学计量特征空间异质性及其环境解释[J].中国草地学报,2025,47(5):12-20.
Liu Teng, Ma Rui, Tian Yongsheng, et al. Spatial heterogeneity of soil ecological stoichiometric characteristics and environmental interpretation in the sand-blocking and fixation zone [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025,47(5):12-20.

[29] 田永胜,马瑞,刘腾,等.阻沙固沙带不同治沙措施对土壤理化性质和酶活性的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):57-64.
Tian Yongsheng, Ma Rui, Liu Teng, et al. The effects of different desertification control measures on soil physicochemical properties and enzyme activities in sand blocking and fixation zone [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):57-64.

[30] Yue Shengjuan, Guo Mengjing, Zou Penghui, et al. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(14):17506-17518.

[31] Yang Liwei, Gao Xiaoqing, Lv Fang, et al. Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas [J]. Solar Energy, 2017,144:244-253.

[32] 周茂荣,王喜君.光伏电站工程对土壤与植被的影响:以甘肃河西走廊荒漠戈壁区为例[J].中国水土保持科学,2019,17(2):132-138.
Zhou Maorong, Wang Xijun. Influence of photovoltaic power station engineering on soil and vegetation: Taking the gobi desert area in the Hexi Corridor of Gansu as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(2):132-138.

[33] Liu Yu, Zhang Ruiqi, Ma Xiaorong, et al. Combined ecological and economic benefits of the solar photovoltaic industry in arid sandy ecosystems [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,262:121376.