



引用格式: 王飞, 陈文业, 郭树江, 等. 沙拐枣叶功能性状对生境变化的响应[J]. 西北植物学报, 2024, 44(1): 0077-0087. [WANG F, CHEN W Y, GUO S J, et al. Response of leaf functional traits of *Calligonum mongolicum* to habitat changes[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(1): 0077-0087.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230428

沙拐枣叶功能性状对生境变化的响应

王 飞¹, 陈文业^{2*}, 郭树江^{1,3}, 杨 帆¹, 王强强^{1,3}, 杨自辉^{1,3}

(1 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070; 2 甘肃省林业科学研究院, 兰州 730020; 3 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃民勤 733300)

摘 要 【目的】揭示民勤地区沙拐枣叶功能性状在不同生境的变异规律, 探明沙拐枣对于干旱荒漠环境的适应策略。【方法】以民勤绿洲-荒漠过渡带沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)为对象, 采用样方法采集样株东、西、南、北 4 个方向中部生长良好的叶片, 用土钻采集植株根系附近深度为 0—60 cm 的土壤样本, 比较分析丘间低地与流动沙丘 2 种生境下沙拐枣叶功能性状特征及相关性, 揭示沙拐枣叶功能性状与土壤因子的关系。【结果】(1) 沙拐枣叶功能性状的变异系数介于 2.39%~24.94%, 比叶面积(SLA)变异系数最大(24.94%), 稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)变异系数最小(2.39%); 沙拐枣叶片的全碳(LCC)、全磷(LPC)含量在样地之间存在显著差异, 而 SLA、LPC 在 2 种生境间存在显著差异。(2) 在丘间低地与流动沙丘 2 种生境下沙拐枣叶片含水量(LWC)与干物质含量(LDMC)分别呈极显著、显著负相关关系, LWC 是 2 种生境下沙拐枣叶功能性状中综合排名前 3 的共同指标因子。(3) 全氮(STN)、pH 值和土壤含水量(SMC)是影响民勤沙拐枣叶功能性状变异的主要土壤因子。【结论】沙拐枣通过改变叶片形态和调节营养物质含量, 以及与土壤因子的相互作用, 以更好适应生境。

关键词 沙拐枣; 叶功能性状; 生境; 土壤因子; 民勤

中图分类号 Q948; S718.43

文献标志码 A

Response of leaf functional traits of *Calligonum mongolicum* to habitat changes

WANG Fei¹, CHEN Wenyue^{2*}, GUO Shujiang^{1,3},
YANG Fan¹, WANG Qiangqiang^{1,3}, YANG Zihui^{1,3}

(1 Gansu Desert Control Reserch Institute, Lanzhou 730070, China; 2 Gansu Research Academy of Forestry Science and Technology, Lanzhou 730020, China; 3 Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin, Gansu 733300, China)

Abstract [Objective] This study aims to reveal the variation patterns of leaf functional traits of *Calligonum mongolicum* in different habitats in Minqin, Gansu Province, China, and to explore the adaptation strategies of *C. mongolicum* to the arid desert environment. [Methods] This study took *C. mongolicum* in the oasis-desert transitional zone as the object, and using sampling methods to collect well growing leaves from the central part of the sample plants in four directions: east, west, north, and south. Soil samples in the depth of 0—60 cm near the roots of plants were collected using a soil drill. The leaf functional traits

收稿日期: 2023-06-29; 修改稿收到日期: 2023-10-27

基金项目: 国家地区基金项目(31960334); 国家青年科学基金项目(31700339); 中国科学院——西部之光青年学者项目

作者简介: 王 飞(1987—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事荒漠生态研究。E-mail: zmffei@126.com

* 通信作者: 陈文业, 学士, 研究员, 主要从事湿地生态学研究。E-mail: gschwy@163.com

and correlation of *C. mongolicum* under two habitats, interdune lowland and active sand dune, were analyzed. The relationship between leaf functional traits and soil factors were analyzed. [Results] (1) the variable coefficient of leaf functional traits was between 2.39% and 24.94%, where specific leaf area (SLA) was the largest (24.94%) while the stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) was the smallest (2.39%). There was significant difference in total carbon content (LCC) and total phosphorus content (LPC) of *C. mongolicum* leaves between the two sites, while there were significant differences in SLA and LPC between the two habitats. (2) The leaf water content (LWC) and leaf dry material content (LDMC) were extremely significantly ($P < 0.01$) and significantly ($P < 0.05$) negatively correlated under the two habitats, respectively. LWC was the top three common index factor in the comprehensive ranking of leaf functional traits of *C. mongolicum* under the two habitats. (3) Soil total nitrogen content (STN), pH value, and soil moisture content (SMC) were the main soil factors affecting the variation of leaf functional traits. [Conclusion] *C. mongolicum* could better adapt to the habitat by changing leaf morphology, regulating nutrient content, and interacting with soil factors.

Key words *Calligonum mongolicum*; leaf functional traits; habitat; soil factor; Minqin

植物功能性状是植物与生境间的桥梁,反映植物自身内部功能间的协调、进化与平衡,进而表现出对环境的适应能力^[1]。随着外界环境条件变化,叶片表现出较高的敏感性和可塑性,其功能性状直接反映植物对资源的获取能力以及适应环境而形成的适应对策^[2-3]。在区域或全球尺度上,气候条件主要影响植物功能性状的分布状况^[4-5];中尺度上,土地利用和干扰发挥重要作用;在小尺度内,地形和土壤因子对性状的分布起决定性作用^[6-7],小尺度范围内的地形变化,其对局部环境的土壤理化性质^[8-10]、种子库^[11]和植物功能性状^[12-13]等产生一定的影响。甘肃民勤东、西、北三面被腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠包围,使该区域成为中国境内强沙源区^[14],丘间低地和流动沙丘是该区重要的风沙地貌类型。其中,流动沙丘的形成是干旱荒漠区土壤退化的产物^[15],植被自然恢复比较缓慢^[16-18]。丘间低地是由风蚀、风积共同作用而形成的地貌单元,植被发育相对较好,地下水相对较高且波动频繁^[19-20]。闫守刚等^[21]研究发现,流动沙丘的植被恢复首先在迎风坡过渡带,而大面积($> 5 \text{ hm}^2$)丘间低地能够对流动沙丘区的植被恢复产生影响。宋创业等^[22]发现,土壤有机质与全氮含量影响着丘间低地植物群落的分布格局。这些研究反映出丘间低地与流动沙丘对植物和土壤能够产生较为明显的影响。因此,研究荒漠植物叶功能性状对丘间低地与流动沙丘的响应及其与土壤因子的关系,对揭示植物群落水平上的生态适应策略具有重要意义。

沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)是蓼科、沙拐枣属灌木,主要分布在半固定、流动沙丘、沙地、沙砾质及砾质荒漠的粗沙积聚处,枝条茂密,萌蘖能力强,

根系发达,适应能力强,是荒漠区典型的沙生植物,在维护生态平衡中发挥了重要的作用。目前,有关沙拐枣的研究主要集中在群落^[23-24]、种群^[25-26]及抗性生理^[27-28]等方面,对沙拐枣叶功能性状与环境因子关系的研究鲜见报道。鉴于此,本文针对不同演替阶段沙拐枣叶功能性状对丘间低地与流动沙丘 2 种生境的响应进行研究,揭示民勤沙拐枣适应性生存策略,以期为该区域的植被恢复及生态重建提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站周边,该站在巴丹吉林沙漠西南缘、石羊河流域下游,地理位置为 $103^{\circ}05'E$, $38^{\circ}35'N$, 海拔 1 378.5 m。该区属于典型的大陆干旱气候,年均降水量 113.2 mm,年均气温 7.7°C ,年平均风速 2.8 m/s ,沙尘频发。研究试验样地位于该站 3 号观测塔及双墩子附近,丘间低地与流动沙丘相间分布,流动沙丘上植被零星分布,主要以一年生草本为主,而丘间低地主要是白刺灌丛沙包、沙拐枣。土壤为棕漠土,土壤基质为细沙,黏粒及养分含量极低。

1.2 试验设计与方法

经过对民勤绿洲-荒漠过渡带的全面踏查,分别在丘间低地与流动沙丘迎风坡 2 种生境设置样地,利用 GPS 测量记录样地经、纬度基本信息(表 1)。在每一样地中,随机选取 5 株形态大小、长势等基本一致的植株,并测量植株高度、冠幅(表 1),分别在植株四周采集完整且成熟的叶片,装入保鲜箱带回实验室;同时采集植株根系附近深度为 0—60 cm 的土壤样本,3 个重复,用于土壤因子测定。

表 1 样地概况
Table 1 General status of plots

样地 Sites	生境 Habitats	高度 Height/cm	冠幅 Crown/cm		经度 Longitude /E	纬度 Latitude /N
			南北方向 North-south	东西方向 East-west		
3 号观测塔 Observation tower 3	丘间低地 Interdune lowland	145.3	202.7	175.0	102°55′15.12″	38°37′54.82″
	流动沙丘 Active sand dune	153.3	186.3	173.3	102°55′15.12″	38°37′54.82″
双墩子 Shuangdunzi	丘间低地 Interdune lowland	115.0	151.6	119.0	102°56′33.40″	38°36′49.84″
	流动沙丘 Active sand dune	108.4	151.6	133.4	102°56′33.40″	38°36′49.84″

1.2.1 叶功能性状指标测定

采用精度为 0.000 1 g 的电子天平称量叶片鲜重(m_1 ,g),将叶片完全浸于去离子水中直至饱和,称重(m_2 ,g);使用叶面积仪(Yaxin1241)中测定叶面积(S ,cm²)。随后将叶片样品置于 65 ℃ 的烘箱烘干至恒重,称重测定叶片干重(m_3 ,g)。叶片干样用粉碎机进行粉碎,过 0.125 mm(120 目)筛,叶片全碳(leaf total carbon content,LCC,mg/g)、全氮(leaf total nitrogen content,LNC,mg/g)含量采用元素分析仪(Costech ECS4024)测定;叶片全磷含量(leaf total phosphorus content,LPC,mg/g)通过浓硫酸-过氧化氢消煮,采用钼锑抗比色法测定^[29]。叶片稳定碳同位素(stable carbon isotope, $\delta^{13}\text{C}$,‰)采用激光碳同位素分析仪(Picarro G2131-I CO₂)测定。

叶片含水量(leaf water content,LWC,%)计算公式为: $m_{\text{LWC}}=(m_1-m_3)/m_1\times 100\%$ 。比叶面积(specific leaf area,SLA,cm²/mg)计算公式为: $S_{\text{SLA}}=S/(1000\times m_3)$ 。叶干物质含量(leaf dry material content,LDMC,%)计算公式为: $m_{\text{LDMC}}=m_3/m_2\times 100\%$ 。

1.2.2 土壤因子测定

土壤含水量(soil moisture content,SMC)采用烘干法测定;有机质含量(soil organic matter,SOM)采用重铬酸钾氧化-外加热法^[29]测定;全氮含量(soil to-

tal nitrogen content,STN)采用半微量凯氏法^[29]测定;速效磷含量(soil available phosphorus content,SAP)采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法^[29]测定;土壤电导率(soil electrical conductivity,SEC)采用电导仪法^[30]测定;土壤 pH 值采用电极法^[30]测定。

1.3 数据统计与处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析及作图。分别采用变异系数(coefficient variation,CV)和方差法对 2 种生境下沙拐枣叶功能性状和土壤因子进行差异显著性分析,利用 Pearson 法分析沙拐枣叶功能性状各指标相关性,分别用主成分分析法和逐步回归分析法筛选其随生境变化的主要指标及土壤影响因子。图表中数据为平均值±标准误差。

2 结果与分析

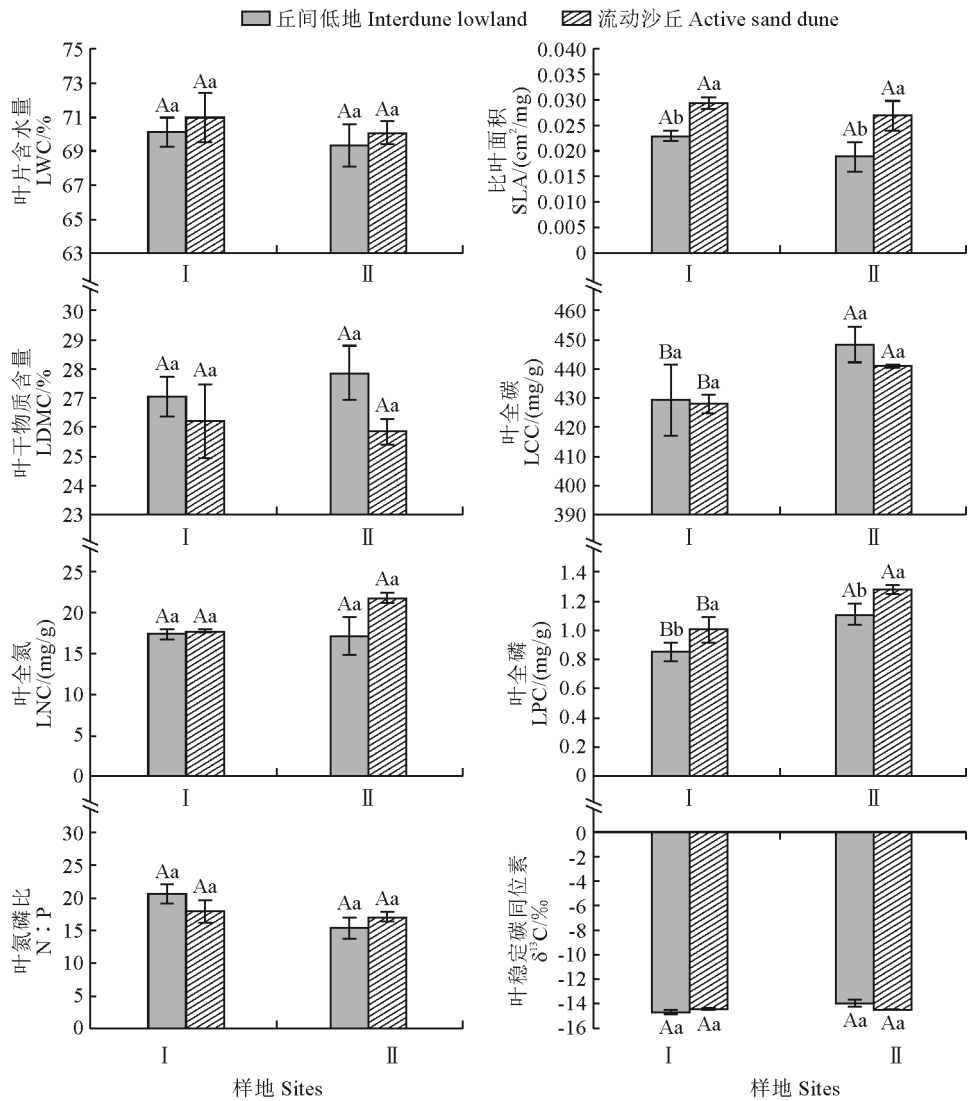
2.1 沙拐枣叶功能性状的变化特征

由表 2 可知,沙拐枣叶功能性状的变异系数介于 2.39%~24.94%,SLA 变异系数最大, $\delta^{13}\text{C}$ 变异系数最小。由图 1、表 3 可知,沙拐枣 LWC、SLA、N:P 表现为 3 号塔>双墩子,但未达到显著水平($P>0.05$);而 LDMC、LCC、LNC、LPC、 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为 3 号塔<双墩子,其中 LDMC、LNC、 $\delta^{13}\text{C}$ 在不同样地之间差异不显著($P>0.05$),双墩子沙拐枣 LCC、LPC 分别显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)高于 3 号塔。

表 2 沙拐枣叶功能性状的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics for leaf functional traits of *C. mongolicum*

叶功能性状 Leaf functional traits	叶片含水量 LWC/%	比叶面积 SLA/ (cm ² /mg)	叶干物质 含量 LDMC/%	叶全碳 LCC/ (mg/g)	叶全氮 LNC/ (mg/g)	叶全磷 LPC/ (mg/g)	叶氮磷比 N:P	叶稳定 碳同位素 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
最大值 Maximum value	75.330	0.035	31.043	460.198	22.998	1.340	23.049	-13.546
中值 Median	69.769	0.023	26.669	440.071	17.938	1.081	17.674	-14.431
最小值 Minimum value	65.582	0.013	22.294	405.635	13.268	0.779	13.675	-14.910
平均值 Average value	70.139	0.025	26.741	436.686	18.533	1.060	17.792	-14.415
标准差 Standard deviation	0.023	0.006	1.995	13.517	2.692	0.189	2.915	0.344
变异系数 CV/%	3.32	24.94	7.46	3.10	14.53	17.85	16.39	2.39



图中不同大写字母表示样地之间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示生境之间差异显著($P<0.05$)。Ⅰ. 3号塔;Ⅱ. 双墩子。

图1 沙拐枣叶功能性状变化特征

Different uppercase letters indicate significant differences between sites ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences between habitats ($P<0.05$). Ⅰ, observation tower 3. Ⅱ, shuangdunzi.

Fig.1 Changes in functional traits of *C. mongolicum* leaves

表3 沙拐枣叶功能性状之间的差异性

Table 3 Differences of leaf functional traits of *C. mongolicum*

叶功能性状 Leaf functional traits	样地 Sites		生境 Habitats		样地×生境 Sites×Habitats	
	F	P	F	P	F	P
叶片含水量 LWC	0.609	0.446	0.513	0.484	0.002	0.964
比叶面积 SLA	2.183	0.159	10.630	0.005 **	0.133	0.720
叶干物质含量 LDMC	0.059	0.811	2.551	0.130	0.427	0.523
叶全碳 LCC	5.361	0.049 *	0.396	0.547	0.196	0.670
叶全氮 LNC	2.367	0.162	4.271	0.073	3.177	0.113
叶全磷 LPC	16.433	0.004 **	6.021	0.040 *	0.020	0.890
叶氮磷比 N:P	4.493	0.067	0.110	0.749	2.243	0.173
叶稳定碳同位素 δ ¹³ C	4.430	0.073	0.742	0.418	5.220	0.056

注: ** 表示在 0.01 水平上差异显著($P<0.01$); * 表示在 0.05 水平上差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: ** indicates a significant difference at the 0.01 level. * indicates a significant difference at the 0.05 level. The same as below.

在 2 种生境条件下,丘间低地沙拐枣 LDMC、LCC 高于流动沙丘,但未达到显著水平($P>0.05$);流动沙丘上沙拐枣 LWC、SLA、LNC、LPC 高于丘间低地,其中流动沙丘上沙拐枣 SLA、LPC 分别极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)高于丘间低地。

2.2 沙拐枣叶功能性状相关性及其主成分分析

由表 4 可知,在丘间低地与流动沙丘 2 种生境下沙拐枣 LWC 与 LDMC 分别呈极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)负相关。在丘间低地中,沙拐枣 SLA 与 LDMC 呈显著负相关($P<0.05$),LNC 与 $\delta^{13}\text{C}$ 呈显著负相关($P<0.05$)。在流动沙丘中,沙拐枣 SLA 与 LCC、LNC 分别呈极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)负相关,LCC 与 LNC 呈显著正相关($P<0.05$)。

如表 5 所示,丘间低地前 3 个主成分的特征值分别为 3.622、2.692 和 1.175,贡献率分别为 45.277%、33.651% 和 14.692%,累计贡献率为 93.620%;流动沙丘前 3 个主成分的特征值分别为 4.322、2.336 和 1.017,贡献率分别为 54.020%、29.205% 和 12.710%,累计贡献率为 95.935%。2 种生境的累计贡献率均 $>85\%$,说明丘间低地与流动沙丘各自 3 个主成分因素是代表沙拐枣叶功能性状变化的主要因素。

通过对各指标综合得分位次进行排名可知,丘间低地前 3 个指标因子为 LPC、LWC 和 LCC;流动沙丘前 3 个指标因子为 LWC、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 LNC,其中 LWC 是 2 种生境下沙拐枣叶功能性状中综合排名前 3 的共同指标因子。

表 4 叶功能性状指标之间的相关系数
Table 4 Correlation coefficients among leaf functional traits

生境 Habitats	叶功能性状 Leaf functional traits	叶片含水量 LWC	比叶面积 SLA	叶干物质 含量 LDMC	叶全碳 LCC	叶全氮 LNC	叶全磷 LPC	叶氮磷比 N:P	叶稳定碳 同位素 $\delta^{13}\text{C}$
丘间 低地 Interdune lowland	LWC	1							
	SLA	0.826 *	1						
	LDMC	-0.960 **	-0.843 *	1					
	LCC	-0.181	-0.500	0.234	1				
	LNC	-0.700	-0.281	0.539	0.052	1			
	LPC	-0.185	-0.166	0.312	0.516	0.230	1		
	N:P	-0.263	0.066	0.040	-0.490	0.505	-0.713	1	
	$\delta^{13}\text{C}$	0.205	-0.356	0.246	0.500	-0.936 *	0.188	-0.628	1
流动 沙丘 Active sand dune	LWC	1							
	SLA	-0.524	1						
	LDMC	-0.840 *	0.714	1					
	LCC	0.471	-0.984 **	-0.646	1				
	LNC	0.578	-0.873 *	-0.744	0.889 *	1			
	LPC	0.098	-0.528	-0.524	0.558	0.746	1		
	N:P	0.400	-0.175	0.023	0.142	-0.072	-0.712	1	
	$\delta^{13}\text{C}$	0.665	0.079	-0.306	-0.163	0.068	-0.338	0.495	1

2.3 沙拐枣立地土壤因子的变化特征

由表 6 可知,研究区土壤 SMC、SOM、SAP 及 SEC 的变化范围分别是 0.364%~1.229%、0.150%~0.223%、0.256~0.659 mg/(100 g)、129.250~397.972 μS ,经方差分析,不同样地、生境之间差异不显著($P>0.05$)。STN 变化范围是 0.003%~

0.016%,3 号塔与双墩子均表现为丘间低地高于流动沙丘,而在双墩子丘间低地与流动沙丘之间差异显著($P<0.05$)。pH 值范围在 8.433~8.993 之间,呈碱性,不同样地之间无显著差异($P>0.05$),但流动沙丘土壤 pH 值高于丘间低地,尤其是在 3 号塔流动沙丘土壤 pH 值显著高于丘间低地($P<0.05$)。

表 5 初始因子载荷矩阵及主成分贡献率

Table 5 Factor matrix and principal component contribution rate

生境 Habitats	叶功能性状 Leaf functional traits	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	综合得分 Comprehensive score	综合位次 Comprehensive ranking	公因子方差 Communality
丘间 低地 Interdune lowland	叶片含水量 LWC	0.614	0.759	−0.190	0.295	2	0.990
	比叶面积 SLA	−0.154	0.869	0.212	0.182	4	0.824
	叶干物质含量 LDMC	−0.214	−0.904	0.344	−0.203	7	0.981
	叶全碳 LCC	0.885	0.211	−0.290	0.229	3	0.913
	叶全氮 LNC	−0.820	0.482	0.287	−0.061	6	0.988
	叶全磷 LPC	0.584	0.228	0.774	0.311	1	0.993
	叶氮磷比 N:P	−0.890	0.122	−0.430	−0.262	8	0.992
	叶稳定碳同位 $\delta^{13}\text{C}$	0.765	−0.447	−0.156	0.074	5	0.810
	特征值 Eigenvalue	3.622	2.692	1.175			
	贡献率 Contribution rate/%	45.277	33.651	14.692			
流动 沙丘 Active sand dune	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	45.277	78.928	93.620			
	叶片含水量 LWC	0.709	0.621	0.261	0.350	1	0.956
	比叶面积 SLA	−0.925	0.036	0.357	−0.196	7	0.984
	叶干物质含量 LDMC	−0.883	−0.162	−0.318	−0.313	8	0.906
	叶全碳 LCC	0.908	−0.108	−0.403	0.171	4	0.999
	叶全氮 LNC	0.957	−0.120	0.003	0.236	3	0.929
	叶全磷 LPC	0.658	−0.683	0.288	0.080	6	0.983
	叶氮磷比 N:P	0.022	0.849	−0.526	0.106	5	0.998
	叶稳定碳同位 $\delta^{13}\text{C}$	0.113	0.843	0.444	0.257	2	0.920
	特征值 Eigenvalue	4.322	2.336	1.017			
	贡献率 Contribution rate/%	54.020	29.205	12.710			
	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	54.020	83.225	95.935			

表 6 不同生境土壤因子的差异

Table 6 Differences of soil factors in different habitats

样地 Sites	生境 Habitats	含水量 SMC/%	有机质 SOM/%	全氮 STN/%	速效磷 SAP/ [mg/(100 g)]	电导率 SEC/ μS	pH 值 pH value
3 号塔 Observation tower 3	丘间低地 Interdune lowland	1.229±0.51Aa	0.223±0.050Aa	0.011±0.003Aab	0.648±0.099Aa	397.972±13.14Aa	8.433±0.20Ab
	流动沙丘 Active sand dune	0.364±0.03Aa	0.150±0.012Aa	0.003±0.001Ab	0.384±0.139Aa	164.000±13.21Aa	8.928±0.05Aa
双墩子 Shuangdunzi	丘间低地 Interdune lowland	0.609±0.17Aa	0.212±0.013Aa	0.016±0.005Aa	0.659±0.184Aa	209.083±5.11Aa	8.742±0.17Aab
	流动沙丘 Active sand dune	0.515±0.10Aa	0.151±0.026Aa	0.005±0.001Ab	0.256±0.101Aa	129.250±7.88Aa	8.993±0.04Aa

注:不同大写字母表示样地之间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示生境之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate significant differences between sites ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences between habitats ($P<0.05$).

2.4 沙拐枣叶功能性状与土壤因子的关系

由表 7 可知,沙拐枣 LDMC、LPC、N:P、 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤因子呈显著相关关系($P<0.05$),而其他指

标 LWC、SLA、LCC、LNC 与其相关性不显著($P>0.05$)。逐步回归分析表明,沙拐枣 LDMC 与 SAP 之间显著正相关($P<0.05$);LPC 随着 SEC 的升高

而降低;N:P 与 SMC 呈显著正相关关系($P<0.05$); $\delta^{13}\text{C}$ 随着 STN、pH 值增大而增大。在 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤因子的逐步回归方程中,STN 的标准化回归系数(1.054)大于土壤 pH 值标准化回归系数(0.710),这表明影响 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要因子是 STN,其次

是土壤 pH 值。
综上可知,在丘间低地和流动沙丘 2 种生境条件下,土壤因子不同程度地影响沙拐枣叶功能性状变异,其中影响沙拐枣叶功能性状的主要土壤因子是 STN、pH 值、SMC。

表 7 叶功能特性与土壤因子之间的逐步回归分析

Table 7 Stepwise regression analyses between leaf functional traits and soil factors

叶功能性状 Leaf functional traits	逐步回归方程 Stepwise regression equations	标准化回归系数 Standardized regression coefficient	相关系数 Correlation coefficient	P
叶干物质含量 LDMC	$m_{\text{LDMC}}=2.457m_{\text{SAP}}+25.656$	$B_{\text{SAP}}=0.592$	0.592	0.042
叶全磷含量 LPC	$m_{\text{LPC}}=-0.001C_{\text{SEC}}+1.231$	$B_{\text{SEC}}=-0.606$	0.606	0.037
叶氮磷比 N:P	$L_{\text{N:P}}=3.444m_{\text{SMC}}+15.452$	$B_{\text{SMC}}=0.626$	0.626	0.029
叶稳定碳同位 $\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{13}\text{C}=52.365m_{\text{STN}}+0.809D_{\text{pH}}-21.936$	$B_{\text{STN}}=1.054, B_{\text{pH}}=0.710$	0.873	0.003

3 讨 论

3.1 沙拐枣叶功能性状对生境变化的响应

地形通过水分、养分等因子的再分配间接影响植被生长,植物叶片通过改变其性状以适应空间异质性^[31]。植物功能性状的变异幅度有限,种内变异系数不超过 30%^[32-33],本研究中,沙拐枣叶功能性状的变异范围在 2.39%~24.94%之间,与上述的研究结果相同,其中 SLA 变异系数最大, $\delta^{13}\text{C}$ 变异系数最小,这可能与民勤干旱恶劣的环境导致沙拐枣叶功能性状的可塑性较小有关。SLA 直接影响着植物对光与碳的获取能力,同时也反映植物对生境水热条件的适应^[34]。本研究中,沙拐枣叶片 SLA 在丘间低地与流动沙丘 2 种生境之间具有极显著差异($P<0.01$),这主要原因是,丘间低地土壤电导率较高(表 6),盐胁迫会降低土壤水势,诱导植物发生水分胁迫,在这种条件下植物会通过降低 SLA 来实现低蒸腾速率,从而减少水分散失来抵抗外界干旱贫瘠的生存环境。

叶片 C、N、P 含量及其比值能够反映植物对营养物质的吸收能力以及养分限制格局^[35-36]。本研究中,民勤双墩子沙拐枣林龄为 40 年,桔梢较多,而 3 号塔林龄为 15 年,生长状况良好,经方差分析双墩子沙拐枣叶片 LCC、LPC 显著高于 3 号塔($P<0.05$),这主要是因为 C 元素在植物体内主要是以有机质形式存在,随着植物生长,叶片中维管组织、LDMC 以及糖类随之增多,从而使叶片中 C 含量升高;同时,植物需要储存更多脂质 P 在叶片中,用于抵御该区严酷的自然环境。叶片中 P 元素主要源

自于土壤,本研究中,流动沙丘沙拐枣 LPC 显著高于丘间低地,而丘间低地土壤中 SAP 高于流动沙丘,这可能与土壤中盐分含量影响土壤 P 的可利用性有关^[37-38],盐分的重要组成元素 Ca 增加能够固定土壤中的 P,使土壤中植物可利用 P 含量减少。叶片 N:P 指示环境中 N、P 限制情况^[39],由表 2 可知,沙拐枣叶片 N:P 平均值是 17.792>16,因此从总体上看,民勤沙拐枣处于磷限制的生长状态。

3.2 不同生境下沙拐枣叶功能性状的相关性及主要指标

在自然环境中,植物需要获取与生长繁殖有关的资源来适应外界环境变化,而这一过程必须通过植物性状间的协同与权衡实现^[40]。因此,植物叶功能性状之间关系密切,会随着生境及物种的变化发生改变^[41]。LDMC 能够反映植物对养分的保存能力^[42]。本研究沙拐枣叶功能性状相关性分析表明,在丘间低地与流动沙丘 2 种生境下沙拐枣 LWC 与 LDMC 分别呈极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)负相关,这主要是因为植物在干旱、养分贫瘠的环境下,叶片含水量随之降低,植株会将叶生物量更多地投入到叶片结构的构建中,提高了叶组织密度和干物质含量,即增加叶片内部水分向叶片表面扩散的距离与阻力,减少植物自身体内水分散失^[43],从而适应外界环境条件变化。本研究中,在丘间低地沙拐枣 SLA 与 LDMC 呈显著负相关($P<0.05$),而在流动沙丘沙拐枣 SLA 与 LCC 呈极显著负相关($P<0.01$)。这主要原因是,沙拐枣通过降低 SLA 增加 LDMC,从而提高水分利用效率,而碳在植物体内主要起骨架作用,碳化合物在植物干重

中占绝大部分,所以三者关系密切。植物的 C、N 元素吸收途径相同,从而随着外界环境条件的变化表现出一致的变化规律。本研究中,流动沙丘沙拐枣叶片 LCC 与 LNC 之间呈显著正相关($P < 0.05$),进一步证明了这一点。综上所述,沙拐枣叶功能性状间存在一定的相关性,反映了植物通过不同的性状组合或适应策略来适应外界生境条件。

通过主成分分析发现,本研究中,LWC 是 2 种生境环境条件下沙拐枣叶功能性状中综合排名前 3 的共同指标因子,可以作为影响沙拐枣叶功能性状相对最为重要的指标。LWC 反映植物水分生理及利用效率,沙拐枣通过调整体内生理特征以适应环境变化。

3.3 沙拐枣叶功能性状与土壤因子的关系

在内陆干旱沙区,丘间低地是沙垄或沙丘间的凹地,与流动沙丘相比,丘间低地生境条件良好,是沙丘生态系统中生物和非生物成分间动态作用的主要场所^[44]。丘间低地的水文条件受到地貌、植被等多种因素的影响^[45],而土壤特征也与流动沙丘具有明显的差异^[46]。本研究结果表明,在不同样地均表现为丘间低地 SMC、SOM、STN、SAP 及 SEC 高于流动沙丘,pH 值反之。干旱沙区降雨量少,沙土蓄水能力差,水分在沙丘中会迅速下渗并向下运动,侧渗到丘间低地,使得丘间低地的水分状况相对较好。丘间低地良好的土壤环境条件,不同生活型植物相继侵入,土壤种子库及幼苗定居,为植被群落的形成提供了便利,同时植物根系生长影响周围土壤理化性质^[47],种群形成发展以及群落演替又影响着土壤的发育过程^[48]。

土壤是植物水分、养分的重要来源,直接影响植物的生长发育、生物量分配及生态策略^[49]。根据逐步回归分析,STN、pH 值、SMC 对沙拐枣叶功能性

状的影响较大。相关研究^[50-51]表明,植物叶片养分主要是由根系从土壤矿物养分中获取,营养元素含量越多,植物光合能力越高,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值就越偏重,所以一般情况下植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤矿物浓度呈正相关^[52-53],其中 N 元素是植物叶绿素合成所必需的矿质元素,这与本研究结果一致。土壤 pH 值影响土壤养分分解与转化、土壤结构以及微生物活动等,进而对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响。在干旱荒漠区,SMC 是影响植物生长发育的主要限制因素,本研究中 SMC 与沙拐枣叶片 N:P 呈显著正相关($P < 0.05$),进一步揭示 SMC 与植物叶片养分之间关系密切,与李玉霖等^[54]、马剑英等^[55]等研究结果相似,表明 SMC 升高能够促进植物对 N、P 的吸收,而在水分受限的荒漠区,植物可能通过调整对养分的利用策略以适应干旱环境条件。

4 结 论

(1)沙拐枣叶功能性状的变异系数介于 2.39%~24.94%,表明不同生境下沙拐枣叶功能性状表现出了差异,其中以 SLA、LCC、LPC 变化最敏感,说明叶片在发育过程中通过调整资源分配策略以适应不同生境环境。

(2)沙拐枣部分叶功能性状之间随生境变化表现出显著的协同与权衡变化。LWC 是 2 种生境环境条件下沙拐枣叶功能性状中综合排名前 3 的共同指标因子。

(3)丘间低地 SMC、SOM、STN、SAP 及 SEC 高于流动沙丘,pH 值反之。在丘间低地和流动沙丘 2 种生境环境条件下,土壤因子不同程度地影响沙拐枣叶功能性状变异,其中影响沙拐枣叶功能性状的主要土壤因子是 STN、pH 值、SMC。

参考文献:

- [1] VIOLLE C, NAVAS M L, VILE D, *et al.* Let the concept of trait be functional[J]. *Oikos*, 2007, 116(5): 882-892.
- [2] 张萍萍,李秧秧,邵明安. 沙地生境和平茬年限对沙柳叶功能特征的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2240-2246.
- [3] ZHANG P P, LI Y Y, SHAO M A. Effects of sandy land water habitat and years after rejuvenation pruning on leaf functional traits of *Salix psammophila* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2240-2246.
- [3] 施宇,温仲明,龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6805-6814.
- SHI Y, WEN Z M, GONG S H. Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River Basin, Shaanxi Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6805-6814.
- [4] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *The New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.

[5] MENG T T, NI J, HARRISON S P. Plant morphometric traits and climate gradients in Northern China: A meta-analysis using quadrat and flora data[J]. *Annals of Botany*, 2009, 104(6): 1217-1229.

[6] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and altitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.

[7] 张小芳,刘贤德,敬文茂,等. 祁连山不同海拔火绒草叶片生态化学计量特征及其与土壤养分的关系[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4012-4020.

ZHANG X F, LIU X D, JING W M, *et al.* Characteristics of *Leontopodium leontopodioides* leaf stoichiometry with altitude and their relationship with soil nutrients in Qilian Mountains, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4012-4020.

[8] 卜耀军,朱清科,包耀贤,等. 陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 153-157.

BU Y J, ZHU Q K, BAO Y X, *et al.* Variability and sensitivities of soil quality indicators of microtopographies in Loess regions of Northern Shaanxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 153-157.

[9] 程富东,戴全厚. 喀斯特坡耕地微地貌土壤养分空间变异性研究[J]. *中国水土保持*, 2016(1): 51-53.

CHENG F D, DAI Q H. Spatial variability of micro-geomorphology soil nutrient of slope farmland in Karst area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016(1): 51-53.

[10] 张志永,时忠杰,张骁,等. 浑善达克沙地不同微地形的土壤物理性质和草本群落分布及其相关性分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2017, 26(1): 69-76.

ZHANG Z Y, SHI Z J, ZHANG X, *et al.* Soil physical properties and herbaceous community distribution in different microtopographies of Otindag Sandy Land and their correlation analysis[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2017, 26(1): 69-76.

[11] 于卫洁,陈宇,焦菊英,等. 黄土丘陵沟壑区撂荒坡面种子雨特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 395-403.

YU W J, CHEN Y, JIAO J Y, *et al.* Characteristics of seed rain on abandoned slopes in the hilly-gullied Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 395-403.

[12] 安红燕,徐海量,叶茂,等. 漫溢干扰过程中微地形对幼苗定居的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 214-221.

AN H Y, XU H L, YE M, *et al.* Effects of the microhabitats on the seedling emergence during the flooding disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 214-221.

[13] 欧芷阳,庞世龙,何峰,等. 桂西南喀斯特山地蚬木叶片性状对微地形变化的响应[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(10): 2225-2231.

OU Z Y, PANG S L, HE F, *et al.* Responses of *Excentrodendron hsienmu* leaf traits to micro-topographical changes in Karst mountains of southwest Guangxi, China[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(10): 2225-2231.

[14] 张锦春,赵明,方峨天,等. 民勤沙尘源区近地面降尘特征研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 17-21.

ZHANG J C, ZHAO M, FANG E T, *et al.* Study on character of dustfall near the ground in Minqin dust source regions[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(3): 17-21.

[15] KASSAS M. Desertification: A general review[J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 30(2): 115-128.

[16] MA J L, LIU Z M. Spatiotemporal pattern of seed bank in the annual psammophyte *Agriophyllum squarrosum* Moq. (Chenopodiaceae) on the active sand dunes of northeastern Inner Mongolia, China[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(1): 97-107.

[17] MIAO C P, LI X H, JIANG D. Spatial variability of *Agriophyllum squarrosum* across scales and along the slope on an active sand dune in semi-arid China[J]. *Arid Land Research and Management*, 2013, 27: 231-244.

[18] OLSSON P A, WILHELMSSON P. The growth of external AM fungal mycelium in sand dunes and in experimental systems[J]. *Plant and Soil*, 2000, 226(2): 161-169.

[19] GROOTJANS A P, ERNST W H O, STUYFZAND P J. European dune slacks: Strong interactions of biology, pedogenesis and hydrology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(3): 96-100.

[20] ROXBURGH S, WILSON J, GITAY H, *et al.* Dune slack vegetation in southern New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Ecology*, 1994, 18: 51-64.

[21] 固守刚,沈自彬,李晓东,等. 流动沙丘与丘间低地过渡带的时空格局对植被恢复的影响[J]. *林业科学*, 2015, 51(4): 103-109.

YAN S G, SHEN Z B, LI X D, *et al.* Effects of spatial and temporal pattern of transition zones between active dunes and interdune lowlands on vegetation restorations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(4): 103-109.

[22] 宋创业,郭柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 40-49.

SONG C Y, GUO K. Relationship between plant community and soil on the inter-dune lowland in the middle of otindag sand land[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1): 40-49.

[23] 古丽努尔·沙比尔哈孜,潘伯荣,段士民. 塔里木盆地塔里木沙拐枣群落特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(10): 3288-3295.

Gulnur Sabirhazi, PAN B R, DUAN S M. The community

characteristics of *Calligonum roborowskii* A. Los in Tarim Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3288-3295.

[24] 万翔, 王立, 徐先英, 等. 民勤绿洲边缘沙拐枣群落分布与土壤理化因子关系研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(22): 51-56.

WAN X, WANG L, XU X Y, *et al.* Study on relationship between the distributions of *Calligonum mongolicum* communities and soil physical and chemical properties in the edge of Minqin oasis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(22): 51-56.

[25] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 等. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4272-4279.

XIE T T, SU P X, ZHOU Z J, *et al.* Structure and dynamic characteristics of *Calligonum mongolicum* population in the desert-oasis ecotone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4272-4279.

[26] 赵小仙, 李毅, 苏世平, 等. 3个地理种群蒙古沙拐枣同化枝解剖结构及抗旱性比较[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1293-1300.

ZHAO X X, LI Y, SU S P, *et al.* Drought resistance analysis based on anatomical structures of assimilating shoots of *Calligonum mongolicum* from three geographic populations[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(5): 1293-1300.

[27] 王静静, 张文鹏, 徐当会. NaCl胁迫下钙对沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)株高及光合特性的影响[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 167-174.

WANG J J, ZHANG W P, XU D H. Influence of calcium on the plant height, photosynthesis, fluorescence and chlorophyll content of *Calligonum arborescens* under NaCl stress[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 167-174.

[28] 樊宝丽, 马全林, 郭树江, 等. 克隆植物沙拐枣的母株和分株对风蚀沙埋的生理生态响应[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(12): 2491-2497.

FAN B L, MA Q L, GUO S J, *et al.* Ecophysiological responses of mother and daughter ramets in response to wind erosion and sand burial in the clonal shrub plant *Calligonum mongolicum*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(12): 2491-2497.

[29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-204.

[30] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 508-510.

[31] 余华, 潘宗涛, 陈志强, 等. 氮添加对侵蚀退化红壤化学性质及苜蓿叶功能性状的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(1): 46-53.

YU H, PAN Z T, CHEN Z Q, *et al.* Effects of nitrogen addition on soil chemical properties and leaf functional traits of *Dicranopteris dichotoma* in the red soil erosion area of Southern China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(1): 46-53.

[32] 罗达, 史彦江, 宋锋惠, 等. 38个榛种质资源叶功能性状与光合特征变异及其相关性[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 11-22.

LUO D, SHI Y J, SONG F H, *et al.* Variation and correlation of leaf functional traits and photosynthetic characteristics of 38 hazelnut germplasm resources[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(1): 11-22.

[33] HALLIK L, NIINEMETS Ü, WRIGHT I J. Are species shade and drought tolerance reflected in leaf-level structural and functional differentiation in Northern Hemisphere temperate woody flora? [J]. *The New Phytologist*, 2009, 184(1): 257-274.

[34] KLEIMAN D, ARSSEN L W. The leaf size/number trade-off in trees[J]. *The Journal of Ecology*, 2007, 95(2): 376-382.

[35] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 509-513.

[36] ZHANG W, LIU W C, XU M P, *et al.* Response of forest growth to C : N : P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 280-289.

[37] 刘建玲, 张凤华. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展[J]. *河北农业大学学报*, 2000, 23(3): 36-45.

LIU J L, ZHANG F H. The progress of phosphorus transformation in soil and its influencing factors[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2000, 23(3): 36-45.

[38] HINSINGER P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 173-195.

[39] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. *The New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.

[40] 何念鹏, 刘聪聪, 张佳慧, 等. 植物性状研究的机遇与挑战: 从器官到群落[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6787-6796.

HE N P, LIU C C, ZHANG J H, *et al.* Perspectives and challenges in plant traits: From organs to communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6787-6796.

[41] 余华, 钟全林, 黄云波, 等. 不同种源刨花楠林下幼苗叶功能性状与地理环境的关系[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 449-458.

YU H, ZHONG Q L, HUANG Y B, *et al.* Relationships between leaf functional traits of *Machilus pauhoi* understory seedlings from different provenances and geographical environmental factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2): 449-458.

[42] 张曦, 王振南, 陆姣云, 等. 紫花苜蓿叶性性状对于旱的阶段响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(9): 2669-2676.

ZHANG X, WANG Z N, LU J Y, *et al.* Responses of leaf traits to drought at different growth stages of alfalfa[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9): 2669-2676.

[43] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山不同演替阶段森林植物功能性状及其与地形因子间的关系[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5915-5924.

HU Y S, YAO X Y, LIU Y H. The functional traits of forests at different succession stages and their relationship to terrain factors in Changbai Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5915-5924.

[44] KIM D, YU K B. A conceptual model of coastal dune ecology synthesizing spatial gradients of vegetation, soil, and geomorphology[J]. *Plant Ecology*, 2009, 202(1): 135-148.

[45] BAKKER C, VAN BODEGOM P M, NELISSEN H J M, *et al.* Plant responses to rising water tables and nutrient management in calcareous dune slacks[J]. *Plant Ecology*, 2006, 185(1): 19-28.

[46] 王新平, 李新荣, 张景光, 等. 沙漠地区人工固沙植被对土壤温度与土壤导温率的影响[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 37-42.

WANG X P, LI X R, ZHANG J G, *et al.* Variation of soil temperature and thermal diffusivity in vegetated and bare sand dunes in arid desert region[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(4): 37-42.

[47] ADEMA E B, GROOTJANS A P. Possible positive-feedback mechanisms: Plants change abiotic soil parameters in wet calcareous dune slacks[J]. *Plant Ecology*, 2003, 167(1): 141-149.

[48] SYACUTE K, KORA, VAN DEN BOGERT J C J M, *et al.* Changes in soil and vegetation during dune slack succession[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15(2): 209-218.

[49] 刘旻霞, 车应弟, 李俐蓉, 等. 甘南高寒草甸微地形上植物叶片特征与环境因子的冗余分析[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2473-2480.

LIU M X, CHE Y D, LI L R, *et al.* Redundancy analysis of leaf traits and environmental factors of alpine meadow in Southern Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(9): 2473-2480.

[50] 朴河春, 朱建明, 朱书法, 等. 植物营养元素的含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔而变化的特征及营养元素相互作用对碳同位素分馏作用的影响[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(增刊 1): 412-418.

PIAO H C, ZHU J M, ZHU S F, *et al.* Altitudinal variations of nutrient concentrations and carbon isotope compositions in a C_3 plant and the effects of nutrient interactions on carbon isotope discrimination in limestone areas of southwest China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(Suppl. 1): 412-418.

[51] 马剑英, 陈发虎, 夏敦胜, 等. 塔里木盆地荒漠植物与表土碳同位素组成研究[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 144-148.

MA J Y, CHEN F H, XIA D S, *et al.* Stable carbon isotope compositions of desert plant and surface soil in the Tarim Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 144-148.

[52] O'LEARY M H. Carbon isotope fractionation in plants[J]. *Phytochemistry*, 1981, 20(4): 553-567.

[53] BROWN K R, VAN DEN DRIESCHE R. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the growth and nutrition of hybrid poplars on Vancouver Island[J]. *New Forests*, 2005, 29(1): 89-104.

[54] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 等. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1716-1725.

LI Y L, MAO W, ZHAO X Y, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions, North China[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1716-1725.

[55] 马剑英, 陈发虎, 夏敦胜, 等. 荒漠植物红砂(*Reaumuria soongorica*)叶片元素和水分含量与土壤因子的关系[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 983-992.

MA J Y, CHEN F H, XIA D S, *et al.* Relationships between soil factors and leaf element, water contents in desert plant *Reaumuria soongorica* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 983-992.