

doi:10.13866/j.azr.2018.01.17

科尔沁沙地典型草地植物功能性状及其相互关系^①

张晶^{1,2}, 左小安¹, 吕朋^{1,2}, 岳喜元^{1,2}, 张婧^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以科尔沁沙地长期封育草地的19种植物为对象,分别测定植物高度(Height)、比叶面积(SLA)、叶片干物质含量(LDMC)、碳含量(LNC)、氮含量(LNN)5个植物功能性状,比较不同生活型(一二年生植物、多年生植物)和功能型(C₃植物、C₄植物)植物功能性状的差异性,探讨沙地内典型草地不同植物功能性状的内在联系及其对环境的适应性。结果表明:多年生植物的LDMC极显著大于一二年生植物,且C₃植物的高度显著大于C₄植物;对于一二年生植物而言,C₃植物的LNC显著大于C₄植物;对于C₄植物而言,多年生植物的LDMC和LNC显著大于一二年生植物。植物功能性状相关分析表明,SLA与LDMC极显著负相关,LNC与LNN极显著正相关。科尔沁沙地长期封育草地植物不同生活型、功能型的功能性状存在明显差异,多年生C₄植物具有较强的生态适应能力。

关键词:草地植物;功能性状;生活型;光合途径;科尔沁沙地

植物功能性状被看成是植物适应环境变化与干扰的不同反映^[1],主要包括植物对生长环境的响应和适应,是将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能联系起来的重要指标^[2],植物周围的基础环境因子如水分、温度、光照、养分等都会影响其功能性状及生长发育。植物高度(Height)、比叶面积(SLA)及叶片干物质含量(LDMC)等,是植物长期适应外部环境过程中经遗传变异以及自然选择而形成的功能性状稳定指标,可以较好地反映植物碳收获最大化所采取的生存对策^[3],且这些功能性状易于观测,可以同时大量植物种类进行比较^[4]。植物高度会影响光来源、热量负荷、湿度和种子扩散^[5];比叶面积(SLA)是重要的植物功能性状之一,往往与植物的生长与生存对策有紧密的联系,能很好地反映植物对周围环境的适应特征,是植物比较生态学研究中的首选指标^[6-8],且SLA的变化并不是独立的,它与LDMC、叶片氮含量以及净光合速率呈一定的相关关系^[9];LDMC表征叶片组织密度、叶片物理抗性,从而体现植物的耐性和抗压能力,Willson等^[10]认为LDMC是在资源利用分类轴上定位植物种类的最佳变量;C和N作为植物生长的生命元素,其化学计量特征是分析C、N元素生物地球化学循环的基础^[11],C是植物生理及代谢过程中的

底物来源,而植物体内C的固定又需要大量酶(N库)的参与,且N素是构建植物光合器官必不可少的营养元素,光合器官的N含量对于植物适应干旱环境具有非常重要的作用^[12]。因此,研究植物功能性状变化有助于揭示不同功能群和群落对环境变化的响应和适应,对于退化植被恢复及管理 and 植物生物生理特征及其过程的影响具有重要的理论及实践意义。

科尔沁沙地位于内蒙古东部的西拉木伦河西岸和老哈河之间的三角地带,总面积约 5×10^4 km²。有关科尔沁沙地植物功能性状的研究已有大量报道,主要集中在不同生境或不同生活型之间植物功能性状的比较及其相关性分析^[9,13]、植物功能性状及多样性对氮素利用效率的影响^[14]、植物功能性状尺度变异与生境变化的关系^[15]等方面。然而,科尔沁沙地地处我国温带半干旱草原区,受人类活动和气候变化的影响,不仅存在各类型沙丘,也发育了以多年生禾本科植物为主的湿草甸、典型草原、疏林草地以及一年生植物为主的沙质草地^[16],但涉及典型草地中不同生活型、生态型来分析植物功能性状的研究报道较少。本文以科尔沁沙地不同草地生境19种植物为研究对象,测定植物高度、SLA、LDMC、LNC和LNN 5项植物功能性状,分析了科尔沁沙地

① 收稿日期:2017-03-16; 修订日期:2017-05-31

基金项目:国家自然科学基金项目(41571106,41622103);国家重点研发计划重点专项课题(2016YFC0500506)资助

作者简介:张晶(1988-),女,博士研究生,主要从事植物生态方面的研究。E-mail:zhangjing_881014@163.com

通讯作者:左小安。E-mail:zuoxa@lzb.ac.cn

中草地生态系统植物生活型和功能型变化以及性状特征与内在联系,掌握本地区草本植物的生态适应策略,即植物为了适应环境变化形成了特有的功能性状组合。

1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地 $42^{\circ}55' \sim 44^{\circ}41' N$, $120^{\circ}42' \sim 121^{\circ}33' E$ 之间,海拔高度 200 ~ 360 m。属温带半干旱大陆性气候,夏季炎热,冬季寒冷;年平均气温 $3 \sim 7^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 年积温 $2\ 200 \sim 3\ 200^{\circ}C$; 年均降水量 350.0 mm, 80% 的降水集中在 6—9 月。草地类型主要有草甸 (M)、典型草原 (MS)、疏林草地 (SG) 和沙质草地 (G)。主要植物种有针茅 (*Stipa capillata*)、羊草 (*Leymus chinensis*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、赖草 (*Leymus secalinus*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、兴安胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、狗尾草 (*Setaria viridis*) 等。其中草甸主要以灰色草甸土为主,典型草原和疏林草地主要以典型栗钙土为主,沙质草地主要以沙质栗钙土为主。

2 研究方法

2.1 取样方法

2014 年 8 月,在研究区域内选取围封保护 20 ~ 30 a 的草甸 (M)、典型草原 (MS)、疏林草地 (SG) 和沙质草地 (G) 4 种典型草地,在每个草地类型内设置 6 个面积为 $20\ m \times 20\ m$ 的典型样地,样地间距最小为 500 m。每个样地随机设置 3 个 $1\ m \times 1\ m$ 样方,调查样方中的物种组成,共获得 19 个样方内的植物种。参照植物功能性状取样和测定标准方法^[17-19],对样方内所有的物种进行叶功能性状的取样和测定,植物功能性状包括:Height (植物高度), cm; SLA (比叶面积), $m^2 \cdot kg^{-1}$; LDMC (叶片干物质含量), $g \cdot kg^{-1}$; LNC (叶片 C 含量); LNN (叶片 N 含量) 等。

每个样方内植物取 5 ~ 10 株,选择 10 片无病虫害的完全伸展叶,用剪刀剪下,置于湿润的滤纸之间,迅速放入密封袋贮藏于便携式车载冰箱内 (内部温度 $< 5^{\circ}C$)。回到实验室将叶片去叶柄后浸入水中,置于黑暗环境中 ($5^{\circ}C$) 冷藏 12 h。取出后迅速吸干叶表水分,在百万分之一的电子天平上称得叶鲜重。然后将叶片平铺在扫描仪上扫描,再用

ImageJ 软件进行处理,得到比叶面积。最后,将扫描后的叶片放入 $60^{\circ}C$ 烘箱内烘 48 h,取出称得叶干重。LDMC = 叶干重/叶鲜重, SLA = 叶面积/叶干重。

为保证每种植物有足够的叶片用以测定样品的碳、氮含量,在每个样方附近获取部分植物的叶,带回实验室烘干称重后,与原来每个样方烘干称重后的样品混合,制成分析植物碳、氮含量的样品。再将样品粉碎,过 0.25 mm 筛,存储备用。分析前在 $65^{\circ}C$ 的干燥箱中烘 1 h,放入干燥器中保存待测。采用元素分析仪 (Costech ECS 4010, Italy) 测定样方中每种植物叶片的碳、氮含量。

2.2 数据分析

采用 SPSS 17.0 进行数据分析,所有数值均采用平均值 \pm 标准差表示。将 19 种植物按生活型分为一二年生植物 7 种,多年生植物 12 种;按光合途径类型分为 C_3 植物 13 种, C_4 植物 6 种;采用单因素方差分析 (ANOVA) 比较不同生活型、不同光合途径^[9] 间植物叶功能性状的差异 (95% 置信区间)。多重比较采用最小显著性差异法 (LSD),采用 Pearson 相关系数检验各植物功能性状之间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 植物功能性状特征

如表 1 所示,不同植物的高度和 SLA 变异系数大于 0.5,存在较大的变异幅度;LDMC、LNC 和 LNN 的变异系数均小于 0.5,存在较小的变异幅度。封育条件下 4 个生境所有植物高度的变化范围为 5.33 ~ 83.96 cm; SLA 的变化范围为 $3.77 \sim 40.66\ m^2 \cdot kg^{-1}$; LDMC 的变化范围为 $161.00 \sim 678.32\ g \cdot kg^{-1}$; LNC 的变化范围为 $38.85\% \sim 59.66\%$; LNN 的变化范围为 $1.34\% \sim 3.39\%$ 。其中,多年生植物与 C_3 植物高度的变化范围 (19.44 ~ 83.96 cm, 6.67 ~ 83.96 cm) 比一二年生植物与 C_4 植物 (5.33 ~ 54.48 cm, 5.33 ~ 54.48 cm) 分别大 31.3% 和 57.3%; 一二年生植物与 C_4 植物 SLA 的变化范围 ($7.30 \sim 40.66\ m^2 \cdot kg^{-1}$, $6.15 \sim 40.66\ m^2 \cdot kg^{-1}$) 比多年生植物与 C_3 植物 ($3.77 \sim 21.92\ m^2 \cdot kg^{-1}$, $3.77 \sim 29.16\ m^2 \cdot kg^{-1}$) 分别大 83.8% 和 35.9%; 一二年生植物与 C_3 植物 LDMC 的变化范围 ($161.00 \sim 678.32\ g \cdot kg^{-1}$, $161.00 \sim$

表 1 科尔沁沙地典型草地 19 种植物主要功能性状

Tab. 1 Functional traits of 19 dominant plant species on typical grassland in the Horqin sandy land

生活型	光合途径	植物种类	植物功能性状				
			Height /cm	SLA /($m^2 \cdot kg^{-1}$)	LDMC /($g \cdot kg^{-1}$)	LNC/%	LNN/%
AS/BS	C ₃	黄花蒿 (<i>Artemisia annua</i>)	54.44 ± 4.73	14.11 ± 2.54	374.31 ± 124.00	43.27 ± 0.39	2.26 ± 0.56
		苦苣菜 (<i>Sonchus oleraceus</i>)	40.33 ± 12.73	15.98 ± 0.25	161.00 ± 52.56	45.94 ± 4.22	1.64 ± 0.50
		大麻 (<i>Cannabis sativa</i>)	15.00	7.30	678.32	59.66	3.39
		牻牛儿苗 (<i>Erodium stephanianum</i>)	10.17	21.87	262.86	43.69	2.74
C ₄	狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	54.48 ± 23.20	21.51 ± 6.13	311.47 ± 106.34	40.72 ± 3.77	1.90 ± 0.45	
	尖头叶藜 (<i>Chenopodium acuminatum</i>)	41.27 ± 27.71	12.88 ± 2.11	210.38 ± 37.57	39.42 ± 2.46	2.02 ± 0.70	
	大籽蒿 (<i>Artemisia sieversiana</i>)	5.33	40.66	219.73	45.68	3.21	
PS	C ₃	碱茅 (<i>Puccinellia distans</i>)	52.50 ± 7.83	11.58 ± 0.37	323.61 ± 52.92	43.05 ± 1.54	1.38 ± 0.25
		赖草 (<i>Leymus secalinus</i>)	52.04 ± 18.79	21.92 ± 21.53	297.22 ± 149.29	46.54 ± 4.45	2.19 ± 0.52
		芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)	72.95 ± 22.71	15.69 ± 6.92	351.02 ± 129.17	43.24 ± 1.21	1.91 ± 0.53
	C ₄	皱果薹草 (<i>Carex dispalata</i>)	19.44 ± 7.34	11.89 ± 4.18	462.72 ± 144.47	40.94 ± 3.01	1.63 ± 0.25
		节节草 (<i>Equisetum ramosissimum</i>)	35.67	3.77	455.00	40.69	1.66
		针茅 (<i>Stipa capillata</i>)	83.96 ± 35.98	5.74 ± 2.06	542.88 ± 190.62	50.66 ± 6.76	2.40 ± 0.77
		甘草 (<i>Glycyrrhiza uralensis</i>)	21.17 ± 3.54	7.71 ± 1.94	600.52 ± 69.13	41.04 ± 0.92	1.34 ± 0.00
		艾蒿 (<i>Artemisia argyi</i>)	26.33	12.22	320.93	44.27	2.00
		兴安胡枝子 (<i>Lespedeza davurica</i>)	25.45 ± 7.70	12.00 ± 2.77	448.66 ± 92.30	38.85 ± 6.45	1.78 ± 0.67
		糙隐子草 (<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	74.00 ± 16.25	17.80 ± 6.45	492.49 ± 167.43	44.70 ± 12.40	1.99 ± 0.61
	羊草 (<i>Leymus chinensis</i>)	45.58 ± 11.06	6.15 ± 5.18	505.38 ± 84.56	41.96 ± 1.45	1.62 ± 0.04	
	白草 (<i>Pennisetum centrasiacicum</i>)	24.17 ± 5.89	15.85 ± 0.58	271.46 ± 9.44	42.62 ± 0.62	1.89 ± 0.05	
	变异系数		0.62	0.67	0.40	0.14	0.30

注: AS 表示一年生植物; BS 表示二年生植物; PS 表示多年生植物; C₃ 表示 C₃ 植物; C₄ 表示 C₄ 植物。下同。

678.32 g · kg⁻¹) 比多年生植物与 C₄ 植物的变化范围(271.46 ~ 600.52 g · kg⁻¹, 210.38 ~ 505.38 g · kg⁻¹) 分别大 57.2% 和 75.4%, 所有植物的 LNC 和 LNN 变化范围差别不大。

3.2 生活型和功能型叶片性状

表 2 显示, C₄ 植物的 LDMC、LNC 在不同生活型间均具有显著差异 ($P < 0.05$), 其中 LDMC 差异极显著 ($P < 0.01$); 表 3 显示, 一二年生植物的 LNC 在不同光合途径间具有显著差异 ($P < 0.05$), 多年生植物的高度在不同光合途径间具有显著差异 ($P < 0.05$); 表 4 显示, 就 LDMC 而言, 一二年生植物与多年生植物间具有极显著差异 ($P < 0.01$)。

表 2 不同生活型植物功能性状方差分析

Tab. 2 One-way ANOVA for plant functional traits of different life forms

	F/P	Height	SLA	LDMC	LNC	LNN
C ₃	F	0.709	0.394	2.237	0.698	3.468
	P	0.403	0.533	0.140	0.407	0.068
C ₄	F	3.668	1.865	23.119	6.555	0.145
	P	0.065	0.182	0.000**	0.016*	0.707

注: F 值和 P 值为方差分析结果; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。下同。

表 3 不同光合途径植物功能性状方差分析

Tab. 3 One-way ANOVA for plant functional traits of different photosynthetic pathways

	F/P	Height	SLA	LDMC	LNC	LNN
AS/BS	F	0.302	2.069	1.986	7.300	1.203
	P	0.588	0.164	0.173	0.013*	0.285
PS	F	5.531	0.907	2.582	1.478	0.067
	P	0.022*	0.344	0.113	0.229	0.796

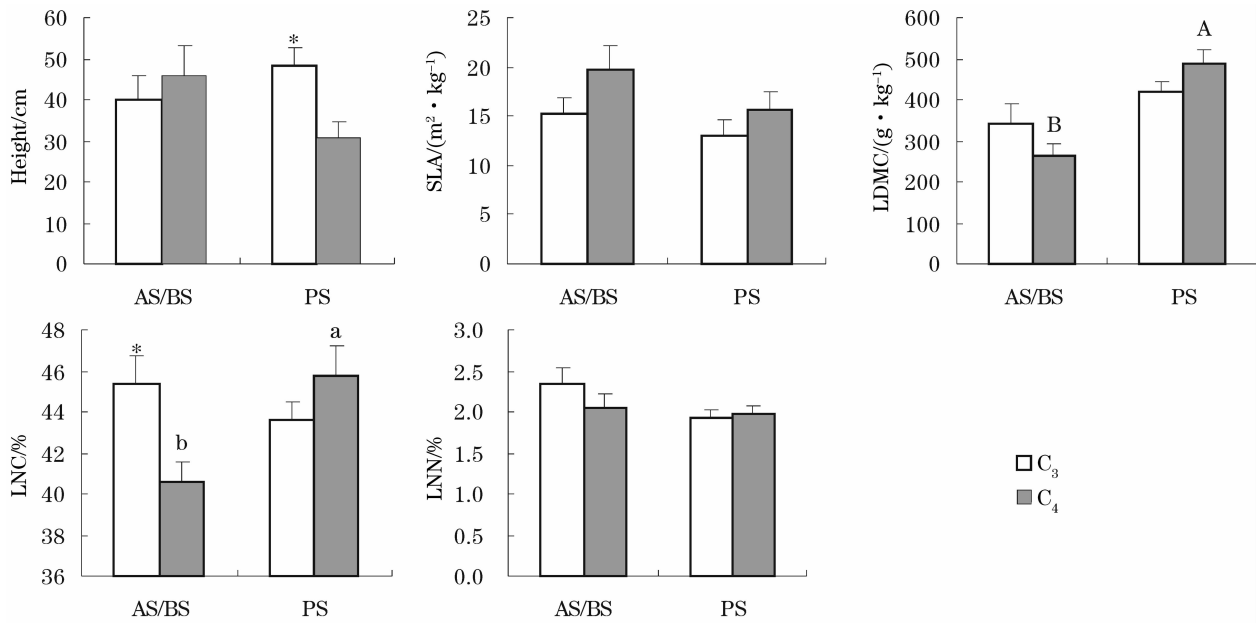
表 4 不同生活型与光合途径植物功能性状方差分析

Tab. 4 One-way ANOVA for plant functional traits of different life forms and different photosynthetic pathways

	F/P	Height	SLA	LDMC	LNC	LNN
AS, BS/PS	F	0.048	3.472	20.380	2.696	1.181
	P	0.827	0.066	0.000**	0.104	0.280
C ₃ /C ₄	F	2.878	3.265	0.061	0.040	0.002
	P	0.093	0.074	0.805	0.843	0.969

注: 小写字母和大写字母表示同一光合途径的一二年生植物、多年生植物分别在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上的差异性; * 表示同一生活型的 C₃、C₄ 植物在 $P < 0.05$ 水平上的差异性。

由图 1 看出, 多年生 C₃ 植物的高度(48.40 cm) 显著大于多年生 C₄ 植物(30.89 cm, $P < 0.05$); 多年生 C₄ 植物的 LDMC(488.73 g · kg⁻¹) 极显著大于



注:小写字母和大写字母表示同一光合途径的一二年生植物、多年生植物分别在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上的差异性; * 表示同一生活型的 C_3, C_4 植物在 $P < 0.05$ 水平上的差异性。

图1 不同植物功能型的植物性状比较

Fig. 1 Compared results of height, SLA, LDMC, LNC and LNN of different plant functional types

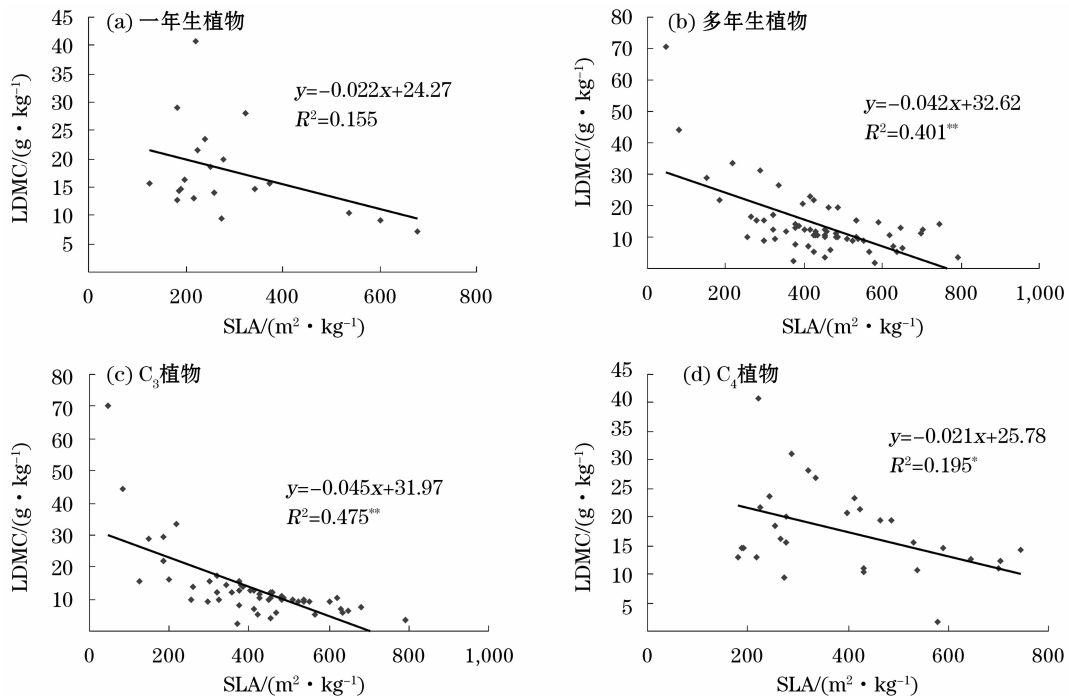


图2 比叶面积与叶干物质含量的关系

Fig. 2 Relationship between specific leaf area and leaf dry matter content

一二年生 C_4 植物 ($265.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P < 0.01$); 多年生 C_4 植物的 LNC (45.72%) 显著大于一二年生 C_4 植物 (40.60% , $P < 0.05$), 一二年生 C_3 植物的 LNC (45.32%) 显著大于一二年生 C_4 植物 (40.60% , $P < 0.05$)。

3.3 叶片功能性状之间的相关性

5 个植物功能性状 Person 相关分析 (表 5) 表明, LNC 与 LNN 极显著正相关 ($P < 0.01$); SLA 与 LDMC 极显著负相关 ($P < 0.01$)。生境中不同生活型和光合型植物 SLA 与 LDMC 相关关系分析表明,

表 5 科尔沁沙地典型草地植物功能性状的相关系数
Tab. 5 Correlation coefficients of plant functional traits in the Horqin sandy land

	LNN/%	LNC/%	LDMC	SLA
LNC	0.616**			
LDMC	-0.032	0.195		
SLA	0.107	-0.030	-0.600**	
Height	0.053	0.155	-0.158	-0.061

注:Height 表示植物高度;SLA 表示比叶面积;LDMC 表示叶干物质含量;LNC(%)表示碳含量;LNN(%)表示氮含量。

多年生植物的 SLA 与 LDMC 极显著负相关(图 2b, $P < 0.01$; $R^2 = 0.40$); C_3 植物的 SLA 与 LDMC 极显著负相关(图 2c, $P < 0.01$; $R^2 = 0.48$); C_4 植物的 SLA 与 LDMC 显著负相关(图 2d, $P < 0.05$; $R^2 = 0.20$),以上相关关系表明多年生 C_3 植物 SLA 与 LDMC 的负相关关系对整个生境中植物 SLA 与 LDMC 的负相关关系贡献较大。

4 讨论

在科尔沁沙地典型草地生态演变过程中,植物不断在进化与演替过程中权衡和分配资源,从而通过一系列选择机制形成特有的功能性状组合。本研究中多年生 C_3 植物的高度大于多年生 C_4 植物,原因可能为草甸、典型草原和疏林草地中多年生 C_3 植物为优势物种,由于物种对养分需求的竞争,导致了多年生 C_4 植物等非优势种的高度相对较低。许多研究表明,SLA 可以反映植物获取资源的能力,高 SLA 的植物通常光合效率及生产率较高,更能适应资源丰富环境,相反 SLA 低的植物能够很好地适应贫瘠的环境^[9],且 SLA 与 LDMC 通常呈负相关关系^[8,20]。本研究中 SLA 与 LDMC 极显著负相关,与淮北、阜康以及乌兰布和等地的研究结果相一致^[21-23]。一年生植物和多年生植物叶片性状存在较大的差异,可以通过相关关系推断植物的 SLA 增大时 LDMC 减小。本研究中对于 LDMC 而言,多年生植物大于一二年生植物,但是二者的 SLA 之间没有显著差异,原因可能是研究中所取物种的 SLA 值相对集中,其变化范围较小,LDMC 的变化保持着相对的独立性^[20]。本研究中植物 SLA 的变化范围为(3.77~40.66 $m^2 \cdot kg^{-1}$),与本区域其他研究结果基本一致^[9,13,24];与 SLA 相类似,LDMC 也体现出植物获取资源的能力。有研究表明,具有较低 SLA、较高 LDMC 的植物将会是演替后期的优势种^[25],LD-

MC 越高的植物其叶片组织密度越大,其抵抗力和耐受力越强。本研究中所有植物 LDMC 的变化范围为 161.00~678.32 $g \cdot kg^{-1}$,与本区域其他研究结果相比,LDMC 值相对偏高^[9,13,24],其原因可能是研究选取的植物中优势物种居多,植物在土壤养分以及水分的竞争中,优势物种占据优势生态位,因此,其获得资源的能力较强,即 LDMC 越大。

氮(N)是植物的基本营养元素,也是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素,通过光合作用同化的碳(C)则是植物生理生化过程的底物和来源^[26]。阎凯等^[27]对滇池流域植物叶片养分的研究和李征等^[28]对滨海盐地碱蓬叶片 C、N 化学计量特征的研究表明,C、N 含量显著负相关,张珂等^[29]对阿拉善荒漠区植物叶片 C、N 含量的研究表明叶片 C、N 含量没有相关关系。而科尔沁沙草地 C 与 N 的关系不同于上述特征,说明本地区植物在固定 C 过程中对 N 的利用效率和权衡策略不同于其他研究的植物类群。

已有研究表明,在强光、高温和干旱的条件下, C_4 植物的光合速率要远高于 C_3 ^[30],特别是 C_4 植物对有效光合养分的利用率强,对繁殖器官及地下部分的分配也比较多^[31]。本研究中就 LDMC 而言,多年生植物大于一二年生植物,进一步分析得多年生 C_4 植物大于一二年生 C_4 植物,表明科尔沁沙地草地生态系统中多年生 C_4 植物具有较高的光合速率,干物质积累能力较强,从而具有较强的生态适应性。因此,基于我国北方相对干旱的气候特征,充分利用多年生 C_4 植物是退化草地生态系统恢复的重要手段^[30]。

5 结论

科尔沁沙地典型草地中不同生活型、功能型植物的功能性状存在明显差异,具体表现为:就 LDMC 而言,多年生植物大于一二年生植物;就多年生植物的高度而言, C_3 植物大于 C_4 植物;就 C_4 植物的 LDMC 和 LNC 而言,多年生植物大于一二年生植物。多年生 C_4 植物具有较强的干物质积累能力,进而具有更高的生态适应性。草地植物功能性状相关关系表明:LNC 与 LNN 极显著正相关,SLA 与 LDMC 极显著负相关,其中多年生 C_3 植物对草地中 SLA 与 LDMC 的负相关关系贡献较大。沙地中典型草地植物为了适应外部环境的变化,不断权衡资源的分配,

其生活型和功能型性状发生了变化。 C_4 植物对于环境变化具有较强的耐性和抗性,在退化草地植被的恢复及管理过程中具有一定的推广意义。

参考文献 (References):

- [1] Zhang G F, Zhao W Z. Species-specific traits determine shrub-annual interactions during a growing season [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 403 - 413.
- [2] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境及生态系统功能 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 150 - 165. [Meng Tingting, Ni Jian, Wang Guohong. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1): 150 - 165.]
- [3] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S. Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems [J]. *Ecological Monographs*, 1992, 62(3): 365 - 392.
- [4] 刘金环, 曾德慧, Don Koo LEE. 科尔沁沙地东南部地区主要植物叶片性状及其相互关系 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(8): 921 - 925. [Liu Jinhuan, Zeng Dehui, Don Koo LEE. Leaf traits and their interrelationships of main plant species in southeast Horqin sandy land [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 921 - 925.]
- [5] Givnish T J. 1-plant stems; Biomechanical adaptation for energy capture and influence on species distributions [J]. *Plant Stems*, 1995: 3 - 49.
- [6] Meziane D, Shipley B. Interacting determinants of specific leaf area in 22 herbaceous species: Effects of irradiance and nutrient availability [J]. *Plant Cell & Environment*, 1999, 22(5): 447 - 459.
- [7] Poorter H, Jong R D. A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction cost of field plants from 15 habitats differing in productivity [J]. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 163 - 176.
- [8] Garnier E, Shipley B, Roumet C, et al. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content [J]. *Functional Ecology*, 2001, 15(5): 688 - 695.
- [9] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较 [J]. *生态学报*, 2005, 25(2): 304 - 311. [Li Yulin, Cui Jianyuan, Su Yongzhong. Specific leaf area and leaf dry matter content of some plants in different dune habitats [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 304 - 311.]
- [10] Wilson P J, Thompson K, Hodgson J G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies [J]. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 155 - 162.
- [11] 尹海龙, 田长彦, 陈春秀, 等. 不同盐度施氮水平下盐地碱蓬幼苗生长及光合色素含量分析 [J]. *干旱区研究*, 2013, 30(5): 887 - 893. [Yin Hailong, Tian Changyan, Chen Chunxiu, et al. Growth and photosynthetic pigment content of *Suaeda salsa* seedlings under different salinity and nitrogen level [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 30(5): 887 - 893.]
- [12] 苗艳明, 吕金枝, 毕润成. 不同功能型植物叶氮含量与光合特性的关系研究 [J]. *植物研究*, 2012, 54(4): 425 - 429. [Miao Yanming, Lv Jinzhi, Bi Runcheng. Relationships between Leaf nitrogen content and photosynthetic characteristics in different plant functional types [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, 54(4): 425 - 429.]
- [13] 周欣, 左小安, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地中南部 34 种植物叶功能性状及其相互关系 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1 489 - 1 495. [Zhou Xin, Zuo Xiao'an, Zhao Xueyong, et al. Plant functional traits and interrelationships of 34 plant species in south central Horqin Sandy Land, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6): 1 489 - 1 495.]
- [14] 李玉霖, 崔夺, 陈静, 等. 科尔沁沙质草地优势多年生植物氮素回收效率的分异特征 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 688 - 695. [Li Yulin, Cui Duo, Chen Jing, et al. Divergence of nitrogen resorption efficiency of dominant perennial [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(3): 688 - 695.]
- [15] 周欣, 左小安, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地植物功能性状的尺度变异及关联 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 20 - 26. [Zhou Xin, Zuo Xiao'an, Zhao Xueyong, et al. Scale variation and correlation of plant functional traits in the Horqin Sandy Land, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(1): 20 - 26.]
- [16] Zuo X, Zhao X, Zhao H, et al. Scale dependent effects of environmental factors on vegetation pattern and composition in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Geoderma*, 2012, 173 - 174 (1/9): 1 - 9.
- [17] Conti G, Diaz S. Plant functional diversity and carbon storage-an empirical test in semi-arid forest ecosystems [J]. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1): 18 - 28.
- [18] Jhc C, Lavorel S, Garnier E, et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide [J]. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335 - 380.
- [19] Spasojevic M J, Grace J B, Harrison S, et al. Functional diversity supports the physiological tolerance hypothesis for plant species richness along climatic gradients [J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(2): 447 - 455.
- [20] Shipley B, Vu T T. Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts [J]. *New Phytologist*, 2002, 153(2): 359 - 364.
- [21] 周济源, 何俊洁, 郭治远, 等. 淮北相山主要优势物种比叶面积与叶干物质质量初步研究 [J]. *淮北师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(3): 51 - 54. [Zhou Jiyuan, He Junjie, Guo Zhiyuan, et al. A study on specific leaf area and leaf dry matter content of five dominant species in Xiangshan Mountain, HuaiBei City, Anhui Province [J]. *Journal of HuaiBei Normal University*, 2013, 34(3): 51 - 54.]
- [22] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 等. 养分与水分添加对荒漠草地植物钠猪毛菜功能性状的影响 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 134 - 146. [Zhao Xinfeng, Xu Hailiang, Zhang Peng, et al. Influence of nutrient and water additions on functional traits of *Salsola nitaria* in desert grassland [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 134 - 146.]
- [23] 高君亮, 罗凤敏, 赵英铭, 等. 乌兰布和沙漠绿洲 3 种杨树比叶面积和叶干物质含量研究 [J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(1):

- 15–20. [Gao Junliang, Luo Fengmin, Zhao Yingming, et al. Specific leaf area and leaf dry matter content of three kinds of poplar in Ulan Buh Desert Oasis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 15–20.]
- [24] 赵红洋,李玉霖,王新源,等. 科尔沁沙地 52 种植物叶片性状变异特征研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1 292–1 298. [Zhao Hongyang, Li Yulin, Wang Xinyuan, et al. Variations in Leaf traits of 52 plants in Horqin Sand Land[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1 292–1 298.]
- [25] Navas M L, Ducout B, Roumet C, et al. Leaf Life Span, Dynamics and Construction Cost of Species from Mediterranean Old-Fields Differing in Successional Status [J]. New Phytologist, 2003, 159(1): 213–228.
- [26] 王凯,吴祥云,卢慧,等. 阜新市主要园林树种叶片生态化学计量特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 236–241. [Wang Kai, Wu Xiangyun, Lu Hui, et al. Leaf stoichiometric properties of garden tree species in Fuxin City[J]. Journal of Arid Land, 2013, 30(2): 236–241.]
- [27] 阎凯,付登高,何峰,等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 353–361. [Yan Kai, Fu Denggao, He Feng, et al. Leaf nutrient stoichiometry of plants in the phosphorus-enriched soils of the Lake Dianchi watershed, southwestern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology 2011, 35(4): 353–361.]
- [28] 李征,韩琳,刘玉虹,等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1 054–1 061. [Li Zheng, Han Lin, Liu Yuhong, et al. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(10): 1 054–1 061.]
- [29] 张珂,何明珠,李新荣,等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6 538–6 547. [Zhang Ke, He Mingzhu, Li Xinrong, et al. Foliar carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6 538–6 547.]
- [30] Sood K C, Mck R. Evolutionary and Ecological Aspects of Photosynthetic Pathway Variation [J]. Theology Today, 2003, 61(2): 173–186.
- [31] Brad R, Gillian D, Colimp O, et al. Experimental investigation of fire ecology in the C₃ and C₄ subspecies of *Alloterospis semialata* [J]. Journal of Ecology, 2010, 98(5): 1 196–1 203.

Functional Traits and Interrelations of Dominant Plant Species on Typical Grassland in the Horqin Sandy Land, China

ZHANG Jing^{1,2}, ZUO Xiao-an¹, LV Peng^{1,2}, YUE Xi-yuan^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}

(1. Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

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

Abstract: In this study, five functional traits including the height, specific leaf area (SLA), leaf dry matter content (LDMC), leaf carbon content (LNC) and leaf nitrogen content (LNN) of 19 dominant plant species on the Horqin sandy land under enclosure were measured. The functional traits differed in two life forms (annual/biennial plants and perennial plants) and two photosynthetic pathways (C₃ plants and C₄ plants). The discrepancies in functional traits between different life forms and photosynthetic pathways were compared and analyzed. Furthermore, the interrelations of functional traits and the adaptabilities of the plant species to the environment in the typical grassland were discussed. The results showed that the LDMC of perennial plants was significantly higher than that of annual/biennial plants. Regarding to the perennial plants, the height of C₃ plants was significantly higher than that of the C₄ plants. For the annual/biennial plants, the LNC of C₃ plants was significantly higher than that of the C₄ plants. Relative to the C₄ plants, the LDMC and LNC of the perennial plants were significantly higher than those of the annual/biennial plants. Correlation analyses showed that there was an extremely significant negative correlation between SLA and LDMC, but an extremely significant positive one between LNC and LNN. Based on the results above, following conclusions were obtained: there were the obvious discrepancies in the plant functional traits between the different life forms and the different photosynthetic pathways in the enclosure grassland ecosystem. The adaptability of perennial C₄ plants to drought environment was strong.

Key words: grassland plant; functional trait; life form; photosynthetic pathway; Horqin sandy land