

古尔班通古特沙漠短命植物的空间分布特征

钱亦兵 吴兆宁 张立运 赵锐锋 王小燕 李有民

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 中国科学院研究生院, 北京 100049. E-mail: dt6@ms.xjb.ac.cn)

摘要 纵穿和横穿古尔班通古特沙漠的两条路线上, 测度早春短命植物物种丰富性、盖度和重要值等参数及调查分析了地形地貌和土壤理化性质等沙漠微生境。经对比发现该沙漠短命植物分布存在着地域上的差异, 即沙漠南部和中部的短命植物物种最丰富, 西部最贫; 短命植物的盖度则是中南部高于北部, 中东部高于西部。短命植物对沙漠生境空间变异的响应, 形成了该沙漠短命植物的种群-生境梯度。其特征为: 地势较高、土壤质地较粗、分选差、有机质含量相对较高、低盐碱的生境中生长沙苔草、东方旱麦草为主的短命植物; 地势稍低、土壤质轻疏松、含有机质, 具一定盐碱性、结皮发育的较干旱生境生长以线叶庭荠、尖喙牻牛儿苗和中亚葫芦巴为主的耐旱、耐盐碱短命植物; 地势低、土壤具一定含水量, 相对富盐碱的生境下, 主要分布小甘菊、念珠芥和小花角茴香等耐盐碱的短命植物。但由于该沙漠微生境空间变化梯度较小, 以及沙漠短命植物总体上表现出的中生性生理特性, 使得多数短命植物集中分布在上述植物种群-生境梯度上地势较高, 风沙土具一定肥力、盐碱性弱的生境序位。

关键词 古尔班通古特沙漠 短命植物 空间分布 生境

短命植物以其种类繁多、生态意义显著深受国内外学术界关注。Hesse等人^[1]研究了澳大利亚中部沙漠地区沙丘移动和降雨过程与短命植物生长的关系。Kudo等人^[2]讨论了全球变暖对日本北部短命植物种子库的影响。Robinson^[3]阐述了阿拉伯半岛阿曼干旱林地中短命植物分布的小尺度差异和生态参数, 以及各种微气候对植物生理学特性的影响。Miltonl 等人^[4]揭示了南非北开普省灌丛沙丘区短命植物定居与多年生草丛植物的竞争机制。中国的早春短命植物区系主要分布在新疆北部, 共 200 余种^[5]。古尔班通古特沙漠现统计到的短命植物 66 种, 约占该沙漠已发现植物种数的 1/3^[6]。由于短命植物对稳定该沙漠沙面有不可替代的作用, 故诸多学者对该区系的短命植物进行了较多研究, 涉及领域有短命植物区系特征^[7-10]、个别短命植物生物生理和生态学特性^[11-17]、某些短命植物定居发育与环境的关系^[18-20]等。但关于古尔班通古特沙漠作为中国最大的固定、半固定沙漠, 是否存在着微生境的空间异质性, 并因短命植物对这种微生境的适应而形成该沙漠特有的短命植物种群-生境梯度的研究未见报道。本研究在纵、横穿越该沙漠测度短命植物格局参数和分析相应的地形地貌及土壤理化性质等微生境的基础上, 借助

CCA(Canonical correspondence analysis, 典范对应分析)和其他定量分析方法, 探讨古尔班通古特沙漠短命植物分布特征, 及其对沙漠生境变化梯度的响应, 研究结果可为沙漠植被恢复和生态建设提供有价值的参数和重要依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠地处半封闭的准噶尔盆地中。沙漠景观丰富多样, 主要为各种形态的沙垄和一些新月型沙丘链、蜂窝状沙丘, 高度 10~50 m。受气流、盆地地形、水文和植被等因素的影响^[21], 沙漠地貌形态出现明显的EW和SN方向上的分异。沙垄多呈SN延伸, 长度达几到几十公里, 所以除沙漠南缘发育大量新月型沙丘链或格状沙丘外, SN方向(后文称纵向)地貌形态变化不大。与之相反, EW向(后文称横向)沙地地貌变异强烈, 各种形态的沙垄或沙丘大致呈无序分布(图 1)。

沙漠区为温带干旱荒漠气候, 年平均温度 5~5.7℃, 极端最高气温 40℃以上, 极端最低气温小于 -40℃, 年蒸发量 2000~2800 mm, >17.2 m·s⁻¹ 的大风天数沙漠中部到边缘 25~77 d 不等。沙漠年降雨量为

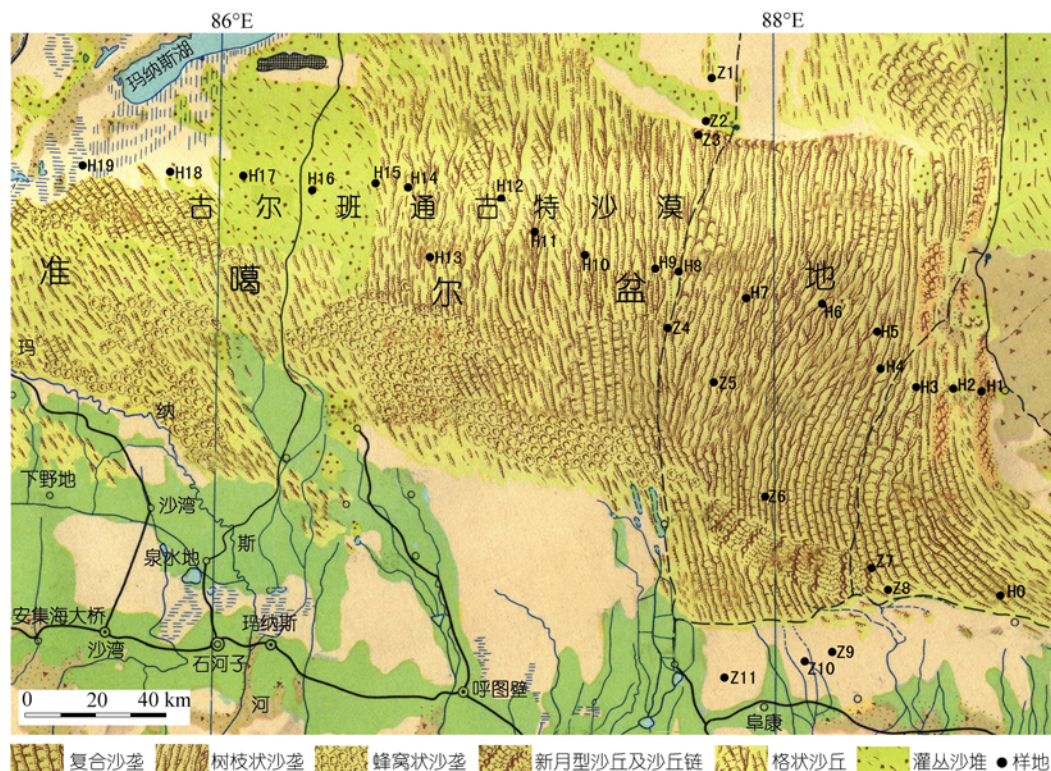


图1 古尔班通古特沙漠地貌形态及采样位置

80~160 mm, 并有沙漠南和西南缘的年平均降水量高于西和西北缘, 以及降水多蒸发小, 降水少而蒸发大的沙区特点^[22]。冬季一般积雪深度 10~30 cm。沙漠中几乎无地表径流, 地下水位较深, 边缘>5 m, 内部>16 m。沙漠土壤以固定、半固定风沙土占绝对优势。固定风沙土主要出露于垄间低地及沙垄中下部, 半固定风沙土多分布于沙垄中部和中上部。与塔克拉玛干沙漠等一些著名沙漠相比, 该沙漠中沙生和耐旱植物种类较丰富, 生活型多样, 短命和类短命植物发育^[6,23]。

1.2 研究方法

大量研究证实, 5 月是古尔班通古特沙漠短命、类短命植物生活周期中的花期或果实成熟的生长旺季^[9,20,24]。此时的观测结果能客观地反映沙漠中短命植物群落物种丰富度和分布格局。为此, 在气象条件最为接近的 2003 年 5 月底和 2006 年 5 月初分别沿 44°14'04"~45°41'52"N, 87°37'09"~88°24'04"E 和 44°56'40"~45°29'55"N, 85°30'35"~88°45'12"E 纵、横穿古尔班通古特沙漠, 对 28 个样地 50 个样点的短命植物进行特征参数调查, 在 10 m×10 m 或 20 m×20 m 大样方的对角线上设置 3 个 1 m×1 m 的小样方, 测度

每种短命植物的个体数、株高、冠幅、多度、频度、盖度, 以及生物结皮盖度等数据。每一样点均取 0~30 cm 土层土壤理化属性分析样品和用 GPS 定位获取海拔高度数据。土壤有机质、养分、全盐含量和 pH, 均按常规方法进行测定^[25], 土壤含水量采用中浅层土(0~30 cm)铝盒取样烘干称重法求出, 粒度测定是在 Malvern 激光粒度仪上进行, 粒度组成及参数由 Folk 和 Ward 的公式^[26]计算获得。

有研究者通过对比认为该沙漠(南部)用物种重要值测度植被状况更客观^[27], 因而在本文选用植物物种重要值进行 CCA 排序, 短命植物在草本植物层片中的重要值=(相对高度+相对盖度+相对密度+相对频度)/400。

大量实践表明 CCA 技术是定量了解植被分布及物种组合与生境关系的理想数理统计工具^[28~32]。本文利用 MVSP 软件对沙漠短命植物进行 CCA 排序, 其他大量数据处理借助 Excel 软件系统完成。

2 结果与讨论

2.1 沙漠短命植物的分布

研究区共统计到短命植物(包括类短命植物)52 种, 分属 18 科(表 1)。参加 CCA 排序的共计 38 种, 它

表 1 古尔班通古特沙漠主要短命植物种类组成与分布^{a)}

科名	中文种名	拉丁文种名	代号	空间分布											
				北部			南部			中部			东部		
				垄间	垄坡	垄顶	垄间	垄坡	垄顶	垄间	垄坡	垄顶	垄间	垄坡	垄顶
十字花科	线叶庭荠	<i>Alyssum linifolium</i>	Al	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	念珠芥	<i>Neotorularia torulosa</i>	Nt				+	+	+	+	+	+	+	+	
	宽翅菥蓂	<i>Isatis violascens</i>	Iv				+	+							
	小果菥蓂	<i>Isatis minima</i>	Im							+	+	+	+		
	螺喙芥	<i>Spirogyne sabulosus</i>						+							
	弯果四齿芥	<i>Tetracme recurvata</i>	Tr				+	+		+	+				
	四齿芥	<i>Tetracme quadricornis</i>	Tq	+						+					
	四棱芥	<i>Goldbachia laevigata</i>						+							
	厚翅芥	<i>Pachypterygium multicaule</i>	Pm	+											
	抱茎独行菜	<i>Lepidium perfoliatum</i>	Lp	+											
	沙地紫罗兰	<i>Matthiola stoddarti</i>					+	+							
菊科	莴苣	<i>Lactuca tatarica</i>	Lt				+	+							
	*沙生婆罗门参	<i>Tragopogon sabulosus</i>						+	+						
	兰刺头	<i>Echinops gmelinii</i>	Eg					+	+			+		+	
	沙生千里光	<i>Senecio subdentatus</i>	Ssu		+		+	+	+	+	+	+	+	+	
	小疮菊	<i>Garhadiolus papposus</i>					+	+							
	小甘菊	<i>Cancrinia discoidea</i>	Cd	+			+	+		+	+				
	*细叶鸦葱	<i>Scorzonera pusilla</i>	Smo	+				+	+	+	+	+		+	
	琉苞菊	<i>Hyalea pulchella</i>	Hp				+	+	+	+	+				
	蝎尾菊	<i>Koeplinia linearis</i>	Kl					+	+		+				
	黄花珀菊	<i>Amberboa turanica</i>					+								
紫草科	弯茎还羊参	<i>Crepis flexuosa</i>	Cf					+	+			+			
	狭果鹤虱	<i>Lappula semiglabra</i>	Ls		+		+	+	+	+	+	+	+		+
	假狼紫草	<i>Nonea capsica</i>	Nc				+	+			+				
	假紫草	<i>Arnebia decumbens</i>	Ade				+	+			+	+			
	硬萼软紫草	<i>Arnebia gutata</i>	Ag	+				+			+	+			
禾本科	滇紫草	<i>Onosma sp.</i>					+	+							
	东方旱麦草	<i>Eremopyrum orientale</i>	Eo	+	+		+	+	+	+	+	+	+		
	齿稃草	<i>Schismus arabicus</i>	Sa	+	+		+	+	+	+	+	+			
豆科	小画眉草	<i>Eragrostis minor</i>	Em		+	+		+	+						
	中亚胡芦巴	<i>Trigonella tenella</i>	Tt				+	+							
	尖果黄芪	<i>Astragalus oxyglottis</i>					+	+							
唇形科	速生黄芪	<i>Astragalus arpilobus</i>	As				+	+	+	+	+	+	+	+	+
	小花荆芥	<i>Nepeta micrantha</i>	Nm				+	+			+		+		
	刺尖荆芥	<i>Nepeta pungens</i>	Np					+			+				
石竹科	矮蝇子草	<i>Silene nana</i>								+					
	拟漆姑	<i>Spergularia salina</i>												+	
藜科	早熟猪毛菜	<i>Salsola praecox</i>	Sp		+		+	+	+	+	+	+		+	
	犁苞滨藜	<i>Atriplex dimorphostegia</i>	Ad	+						+					+
罂粟科	小花角茴香	<i>Hypocoum parviflorum</i>	Hy				+	+	+	+	+	+		+	+
车前科	小车前	<i>Plantago minuta</i>	Pm				+	+	+	+	+				
大戟科	沙大戟	<i>Chrozophora sabulosa</i>	Cs		+	+		+	+	+	+	+			
牻牛儿苗科	尖喙牻牛儿苗	<i>Erodium oxyrrhynchum</i>	Er	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+
蒺藜科	速生霸王	<i>Zypophyllum lehmannianum</i>	Zl							+	+			+	
玄参科	弯果婆婆纳	<i>Veronica campylopoda</i>							+						
莎草科	*沙苔草	<i>Carex physodes</i>	Cp	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
伞形科	*簇花芹	<i>*Soranthus meyeri</i>	Sm		+		+	+		+		+		+	+
	*荒地阿魏	<i>*Ferula syreitschikowii</i>	Fs							+		+	+		
百合科	*叉梗顶冰花	<i>*Gagea divaricata</i>	Gs				+	+		+	+		+		
	*异翅独尾草	<i>*Eremurus anisopterus</i>								+					
	*粗柄独尾草	<i>*Eremurus inderiensis</i>	Ei									+		+	
石蒜科	*鸢尾蒜	<i>*Ixiolirion tataricum</i>		+											

a) *为类短命植物; 无代号的未参加 CCA 分析

们是各植物群落中有意义的伴生种,而那些重要值极低、生态学意义较小、在群落中无代表性的种则不参加 CCA 排序. 研究区内分布广泛的短命植物种主要是沙苔草、尖喙牻牛儿苗、线叶庭荠、狭果鹤虱、东方旱麦草、念珠芥、沙生千里光、齿稗草、速生黄芪等,除沙苔草、尖喙牻牛儿苗和线叶庭荠外,其他短命植物的重要值较低.

() 区域分布特征. 古尔班通古特沙漠南部(约 $44^{\circ}14' \sim 44^{\circ}40'N$)和中部(约 $44^{\circ}40' \sim 45^{\circ}20'N$, $87^{\circ}00' \sim 88^{\circ}22'E$)短命植物物种最丰富,北部(约 $45^{\circ}20' \sim 45^{\circ}42'N$)和东部(约 $88^{\circ}22' \sim 88^{\circ}45'E$)次之,西部(约 $85^{\circ}30' \sim 87^{\circ}00'E$)最少(表1). 短命植物盖度纵向上的变化幅度较大,大约在 50%上下波动. 总体上看,北部盖度较低(图2). 横向上,短命植物盖度中东部较高,西部盖度相对较低(图3). 总体变化在 0~70% 的范围.

() 不同地貌部位的分布特征. 沙生短命植物类,如沙苔草、尖喙牻牛儿苗、线叶庭荠、狭果鹤虱、东方旱麦草、念珠芥、沙生千里光、齿稗草、速生黄芪、小花角茴香、簇花芹、沙大戟、早熟猪毛菜等,在沙垄各地貌部位均有分布. 其中,尖喙牻牛儿苗、念珠芥主要见于垄间地;狭果鹤虱和沙生千里光在垄坡上出现的频率更高一些;东方旱麦草和齿稗草多

分布在垄间地—垄坡部位;簇花芹、沙大戟和早熟猪毛菜常见于垄坡—垄顶. 另有小甘菊、小车前、叉梗顶冰花、犁苞滨藜、速生霸王等,分布于垄间地和沙垄中下部的固定沙面上(表1).

一般,垄顶短命植物的多样性差,结皮发育的垄坡或垄间地短命植物的丰富度和盖度均较低,反映出短命植物定居繁殖与生物结皮发育的反消长竞争关系^[4].

在生物结皮发育程度不很高(盖度 $< 50\%$)的状况下,不同地貌部位短命植物盖度值的变化为垄东坡 $>$ 垄间地 $>$ 垄顶 $>$ 垄西坡.

观测发现,多数南北向延伸的沙垄西坡缓、东坡陡,两者坡度相差 $2^{\circ} \sim 10^{\circ}$. 西坡为高频次风或强风的迎风坡,东坡为这些风的背风坡. 在强烈的风蚀和日照影响下,西坡种子库中种子丰富度及种子着床条件均不及东坡好.

2.2 短命植物空间分布与环境的关系

() 沙漠生境的空间差异. 正如前文所述,整个沙漠区地处温带干旱荒漠气候,沙漠中无地表径流,5~16 m 的地下水位对短命植物的生长发育无影响. 另据沙漠中专业气象站监测,2003 年和 2006 年沙漠中 5 月降水均为 20.9 mm. 而沙漠周边气象资料表明,与短命植物生长关系密切的温度和降水量在

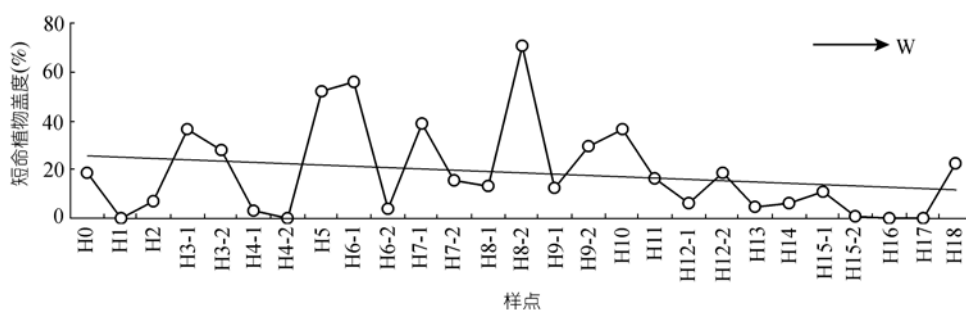


图2 古尔班通古特沙漠短命植物特征值的纵向变化

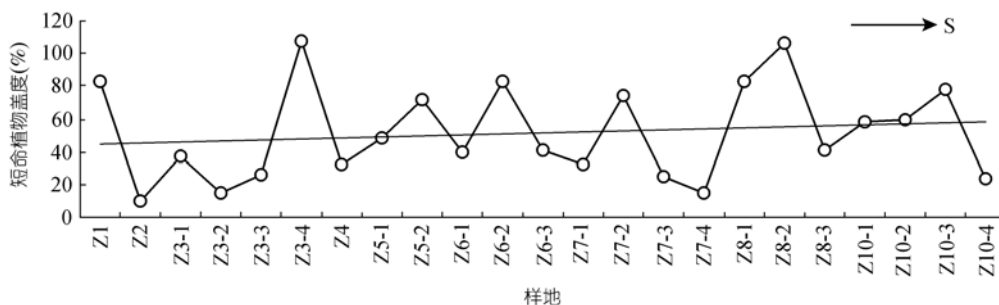


图3 古尔班通古特沙漠短命植物特征值的横向变化

时间和空间上的变化不很显著(表 2). 我们注意到, 在相同的气候及差异不大的气象和水文条件下, 影响短命植物分布特征的环境因子主要有地形高度(alt)、土壤粒度均值(Mz)、粗物质粒级(ϕ_1)和分选系数(σ)、土壤含水量(SM)、有机质含量(OM)、全钾含量(TK)、全盐含量(TS)、pH 以及生物结皮盖度(Crust).

古尔班通古特沙漠的生境具有空间异质性, 其横向上的变化特征是: 沿 CCA 第一排序轴的正向, 出现由沙漠东部较高地势、风沙土贫营养物质和盐碱、含水量低→西部地势略低、土壤粗物质颗粒较大、分选性差、含相对高的有机质、结皮(Crust)发育→中西部地势低、土壤质地粗, 以及盐碱、TK 和水分含量较高的演替趋势(图 1 和 4(a)). 纵向变化特征为: 大致由北向南, 地势先低后高再降低, 与之同步变化的是土壤质地; 土壤所含营养物质(TK 和 OM)、水分和盐碱性则表现出由高到低, 土壤分选性为由差到好的趋势; 结皮盖度呈现南缘较高的特点(图 1 和 5(a)).

不难看出, 尽管该沙漠生境存在着一定的空间异质性, 但生境的空间变化梯度较小, 绝大多数样点在 CCA 排序图中集中分布(图 4(a)和 5(a)).

() 短命植物群丛与环境的关系. CCA 排序结果显示, 短命植物分布对生境的空间变异有明显响应. 横向上短命植物在 CCA 排序图中聚为 3 类, 大致对应 3 个地段. 沙漠的中东部(样地 H0~H9), 地势较高, TS, TK, pH 和 Mz 相对较低. 分布的短命植物(图 4(b), 类)中, 沙苔草、东方旱麦草、速生黄芪、沙生千里光、荒地阿魏、细叶鸦葱、叉梗顶冰花、小车前等是生长于土壤质地不均、低盐碱性, 有机质含量稍高, 生物结皮发育的生境中; 线叶庭荠、齿稈草、异翅独尾草、小果菰蓝、兰刺头则适应于土壤质轻的疏松沙地. 沙漠中西部(除 H13, H14, H15 外的样地 H10~H18)短命植物主要生长在质地较粗且富含有机质和 TK 的土壤中, 此类表现出较耐旱耐盐碱和与生物结皮密切共生的特性, 典型植物有尖喙牻牛儿苗、念珠芥、沙大戟、犁苞滨藜、四齿芥、小甘菊(图 4(b),

类). 由狭果鹤虱、簇花芹和小花角茴香为当地短命植物群丛绝对优势种的沙漠特殊区域(图 4(a), (b), 类和), 地势低、土壤质地较粗、含一定的盐碱和水分. 簇花芹和狭果鹤虱与土壤质地和水分呈正消长, 小花角茴香则耐盐碱.

纵向上的 CCA 排序结果显示 3 类短命植物大致分布在两个地段(图 5(b)). 中南部及北部个别样点(Z1)地势高, 风沙土质地粗, 土壤含水量相对好, 所以生长与地形高度、土壤水分及质地等微生境参数值较高有关的短命植物. 它们可和横向上的中东部短命植物组合相对比(图 5(b), 类). 沙漠中部和南部地势较低的一些地段, 土壤具一定的盐碱性, 生物结皮发育, 主要生长一些定居能力很强的种属, 如尖喙牻牛儿苗、线叶庭荠、中亚胡芦巴、琉苞菊等, 而中亚胡芦巴、琉苞菊在沙漠其他地段少见(图 5(b), 类). 沙漠中北部的少数样点, 发育那些生长在含有机质和 TK、粗物质粒径较大、分选性差、具一定盐碱性土壤环境中的短命植物, 如犁苞滨藜、小甘菊、念珠芥等(图 5(b), 类). 可以看出, 纵向上随着高度、土壤水分和沙物质平均粒径的降低, 结皮盖度的增加, 短命植物出现了由类 →类 →类的演替, 大致对应着古尔班通古特沙漠生境由中南部向南北两缘的变化梯度.

短命植物对沙漠环境的适应, 是利用其特殊的生理特性和短的生活周期来完成的, 古尔班通古特沙漠较小的生境空间梯度下生长的短命植物区系, 应该有较一致的生活型. 对短命植物的营养器官解剖发现, 短命植物的根、茎、叶虽有一些旱生结构, 但总体上看仍属于典型的中生植物 [15,16,24]. 而每一种短命植物对其生存环境的协调与适应都同其种子形态、繁殖方式及其生理生态学特性密切相关. 沙苔草既可种子繁殖, 也可靠地下器官繁殖, 所以, 无论是流动、半流动沙地或风蚀沙面, 还是结皮发育的沙地均可定居、生长. 另外, 沙苔草形态为疏丛性具根状茎和长匍匐枝, 耐旱性好, 为典型的专性沙生短命植

表 2 古尔班通古特沙漠周边地区的有关气象数据

年份	项目	漠北—福海	漠西—莫索湾	漠南—蔡家湖
2003 年	年平均气温/	4.5	6.6	5.9
	年降水量/mm	100.2	117	133.5
	年平均气温/	5.4	8.3	7.6
2006 年	年降水量/mm	98.2	101.5	109.4
	年平均气温/	4.9	7.3	6.6
	年降水量/mm	106.6	115.4	129.8
3 年平均(2000 年, 2003 年和 2006 年)				

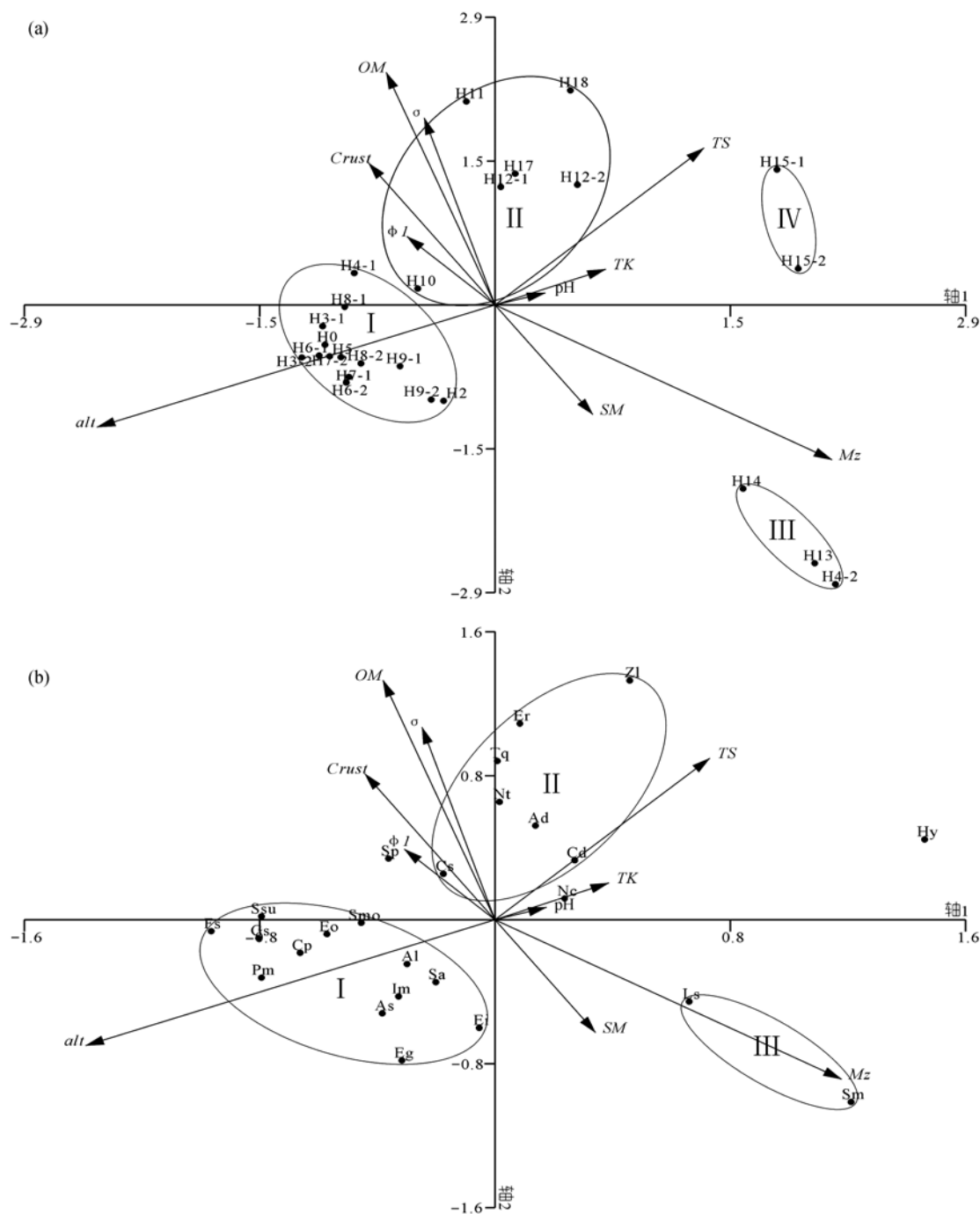


图 4 古尔班通古特沙漠横向植物 CCA 排序图

物。尖喙牻牛儿苗的种子随风飘落,传播方便,同时,种子在春秋两季都可萌发,耐盐碱,在准噶尔盆地南缘常生长在梭梭林中,是其短命植物层片的优势种,也是梭梭群落春季的主要伴生种。线叶庭荠叶窄耐旱,是可生长在多种生境的短命植物^[9],且常与细物质土壤相联系。然而,其果实/种子形状不利于在物

理结皮发育好的地段萌发, 所以, 在结皮发育的西部和沙物质粗的东部少见。东方旱麦草根系浅利于快速吸收土壤水分, 营养器官的结构简单、光和作用效率高, 生长发育快 [33]; 念珠芥、沙生千里光、齿稗草等都属于一类适应于沙质土壤的沙生短命植物 [15]。小花角茴香在盐碱含量高的沙漠西部, 以及簇花苣荬

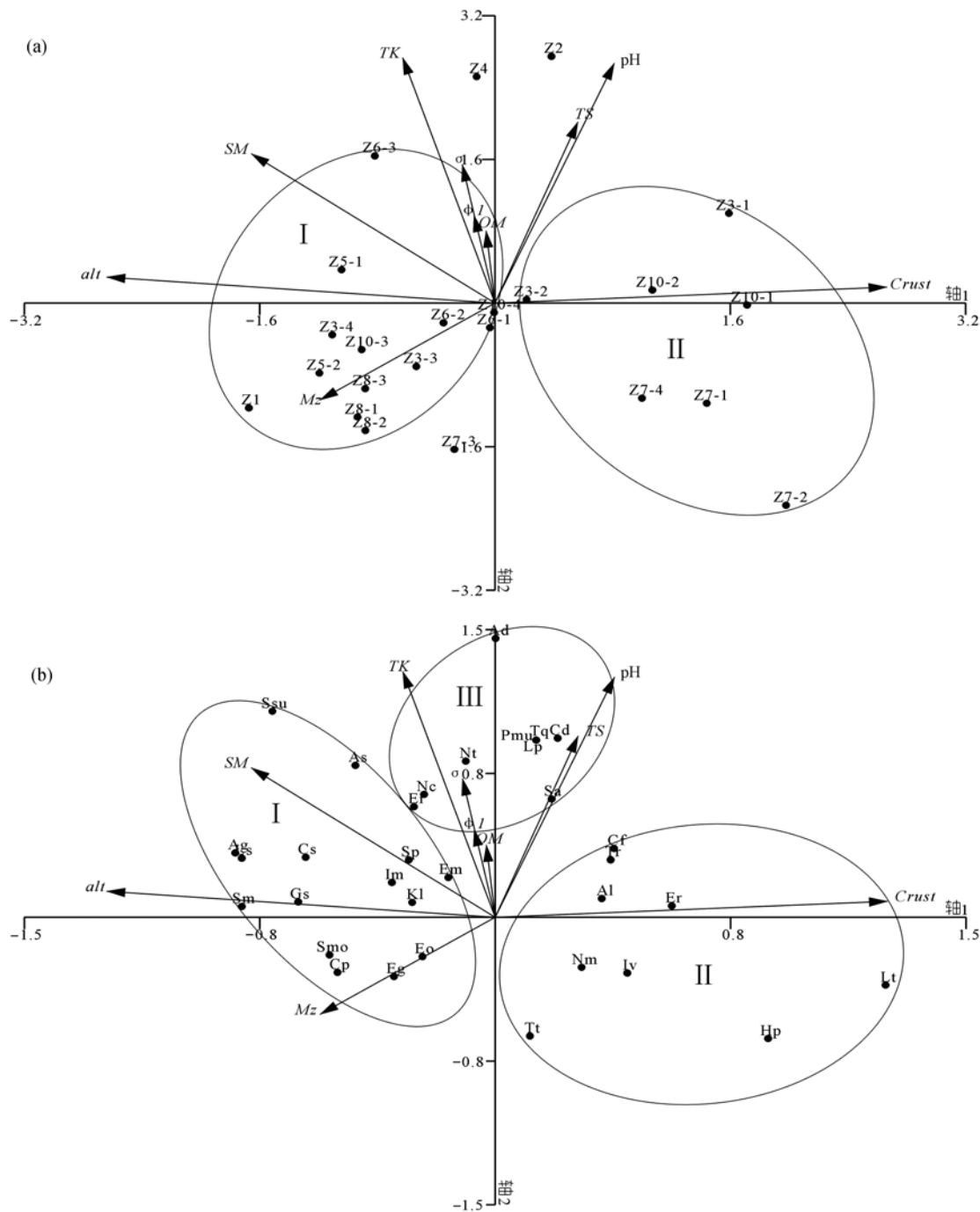


图 5 古尔班通古特沙漠纵向植物 CCA 排序图

沙物质较粗的沙漠东部某些样点作为绝对优势种，与其种子形态、特有的营养器官和传播途径有关。

总之，古尔班通古特沙漠地貌和风沙土理化性状的空间异质性，以及短命植物对该沙漠环境的适应，形成了古尔班通古特沙漠上述特有的短命植物种群-生境梯度。

3 结论

古尔班通古特沙漠短命植物受区域性水热条件的影响，丰富度和盖度存在着区域上的差异，即沙漠南部和中部的短命植物物种最丰富，西部最贫；盖度则是中南部高于北部，中东部高于西部。在地形地貌

及土壤理化性状等微生境的影响下,短命植物种群出现了空间分化,形成一定的短命植物种群-生境梯度。在CCA排序图中,其主要表现为:在地势较高、土壤质地较粗不匀、有机质含量较高、低盐碱的生境中生长有以沙苔草、东方旱麦草为代表的短命植物。在地势稍低、土壤质轻疏松、含有机质,具一定盐碱性、结皮发育的较干旱生境;生长以线叶庭荠、尖喙牻牛儿苗和中亚葫芦巴为主的耐旱、耐盐碱短命植物。地势低、土壤具一定含水性,相对富盐碱的生境下,主要分布小甘菊、念珠芥和小花角茴香等耐盐碱短命植物。但由于古尔班通古特沙漠微生境空间变化梯度较小,加之该沙漠绝大多数短命植物具有中生性为主的生理和解剖学特性,导致多数短命植物集中分布在该沙漠短命植物种群-生境梯度上地势较高,土壤具一定肥力、盐碱性弱的生境序位。

致谢 蒋进和唐立松参加了部分野外工作,唐自华进行了样品的粒度分析,杨青提供了相关的气象资料,在此对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- Hesse P P, Simpson R L. Variable vegetation cover and episodic sand movement on longitudinal desert sand dunes. *Geomorphology*, 2006, 81: 276—291 [DOI]
- Kudo G, Nishikawa Y, Kasagi T, et al. Does seed production of spring ephemerals decrease when spring comes early? *Ecol Res*, 2004, 19: 255—259 [DOI]
- Robinson M D. Growth and abundance of desert annuals in an arid woodland in Oman. *Plant Ecol*, 2004 174: 137—145 [DOI]
- Milton I S J, Dean W R J. Disturbance, drought and dynamics of desert dune grassland, South Africa. *Plant Ecol*, 2000, 150: 37—51
- 毛祖美, 冯惠兰. 新疆短命植物区系的研究. 见: 新疆生物土壤沙漠研究所, 编. 新疆植物学研究文集. 北京: 科学出版社, 1991. 93—101
- 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. *生态学报*, 2002, 22(11): 1923—1932
- 郑度. 准噶尔沙漠植被与环境的关系. 见: 中国科学院治沙队第一次学术报告会文集(自然地理). 北京: 科学出版社, 1962. 327—341
- 李世英. 北疆荒漠植被的基本特征. *植物学报*, 1961, 9(3-4): 287—313
- 毛祖美, 张佃民. 新疆北部早春短命植物区系纲要. *干旱区研究*, 1994, 11(3): 1—26
- 陈昌笃, 张立运, 胡文康. 古尔班通古特沙漠的沙地植物群落、区系及其分布的基本特征. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1983, 7(2): 89—99
- 张立运. 新疆莫索湾地区短命植物的初步研究. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1985, 9(3): 213—222
- 刘晓云, 刘速. 早春短命、类短命植物的生态生物学特点. *干旱区研究*, 1992, 9(增刊): 46—55
- 潘伟斌, 黄培佑. 四种短命植物若干生物学生态学特性的研究. *植物生态学报*, 1995, 19(1): 85—91
- 王焯. 新疆短命及类短命植物的物候观测. *干旱区研究*, 1993, 10(3): 34—39
- 杨戈. 早春短命植物营养器官解剖学的研究. 见: 新疆生物土壤沙漠研究所, 编. 新疆植物学研究文集. 北京: 科学出版社, 1991. 203—211
- 周桂玲, 魏岩, 阿依吐尔汗·热依木, 等. 8种短命植物营养器官的解剖学观察. *新疆农业大学学报*, 2004, 27(2): 12—18
- 关挂兰, 李仲元, 杨玉锁, 等. 新疆干旱区短命植物湾果葫芦巴结瘤固氮的研究. *干旱区研究*, 1988, 5(4): 1—6
- 吕自力, 黄培佑, 刘立, 等. 莫索湾 150 团沙区短命植物与小地形的关系. *新疆环境保护*, 1995, 17(3-4): 7—10, 27
- 李向义. 新疆短命植物根系特征与立地条件的关系. *干旱区研究*, 2000, 17(3): 28—34
- 王雪芹, 蒋进, 王远超, 等. 古尔班通古特沙漠南部短命植物生长对水热条件变化的响应. *科学通报*, 2006, 51(增刊): 88—93
- 吴正. 准噶尔盆地沙漠地貌发育的基本特征. *中国沙漠与海岸沙丘研究*. 北京: 科学出版社, 1997. 29—43
- 魏文寿. 现代沙漠对气候变化的响应与反馈. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 59
- Qian Y B, Wu Z N, Zhang L Y, et al. Impact of Habitat Heterogeneity on Plant Community Pattern in Gurbantunggut Desert. *J Geogr Sci*, 2004, 14(4): 447—455
- 任珺, 陶玲. 新疆北部短命植物的特征分析. *草业科学*, 2005, 22(5): 19—24
- 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 62—146, 196—233, 466, 481—489
- 成都地质学院陕地队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用. 北京: 地质出版社, 1976. 44—54, 66, 90
- 张林静, 岳明, 顾峰雪, 等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系. *应用生态学报*, 2002, 13(6): 658—662
- Jafari M, Zare Chahouki M A, Tavili A, et al. Effective environmental factors in the distribution of vegetation types in Poshtkouh rangelands of Yazd Province (Iran). *J Arid Environ*, 2004, 56(4): 627—641 [DOI]
- Monier M, Abd El-Ghani, Wafaa M A. Soil-vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai, Egypt. *J Arid Environ*, 2003, 55(4): 607—628
- 沈泽昊. 山地森林样带植被-环境关系的多尺度研究. *生态学报*, 2002, 22(4): 461—470
- Yang H, Lu Q, Wu B, et al. Vegetation diversity and application in sandy desert revegetation on Tibetan Plateau. *J Arid Environ*, 2006, 65(4): 619—631 [DOI]
- 张元明, 陈亚宁. 塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释. *地理学报*, 2004, 59(6): 903—910
- 刘长娥, 蒋珊芬. 短命植物三种旱麦草形态学研究——营养器官的解剖构造. *新疆畜牧业*. 1995, 4: 16—19