

浑善达克沙地丘间低地植物群落的分类与排序

刘海江, 郭 柯*

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要:对浑善达克沙地中部丘间低地的草本植物群落进行 TWINSpan 分类和 DCA 排序的研究结果表明, 这些植物群落可分为 4 组: 第 1 组为大针茅(*Stipa grandis*) + 糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落, 固定时间长, 比较稳定, 土壤全氮和有机质含量在四组群落中最高; 第 2 组为冰草(*Agropyron cristatum*)群落, 主要物种有冰草、冷蒿(*Artemisia frigida*)、苔草(*Carex* sp.) 和糙隐子草, 土壤全氮和有机质含量比第一组的低; 第 3 组为羊草(*Leymus chinensis*) + 赖草(*Leymus secalinus*)群落, 群落物种少且主要为 1 年生种, 有过严重的干扰, 土壤全氮和有机质含量在 4 组群落中最低; 第 4 组为西伯利亚剪股颖(*Agrostis sibirica*)群落, 属于草甸性质的群落, 土壤可溶性钠和可溶性钾含量高。群落 DCA 排序及排序轴与土壤因素的相关分析表明, 土壤可溶性钠和 pH 值对群落的分布有显著影响, 但群落在可溶性钠的梯度上分异更明显, 说明盐分是影响浑善达克沙地中部丘间低地草本植物群落分布的主要因素。

关键词:浑善达克沙地; 草本植物群落; 土壤因素; 分类; 排序

Classification and ordination analysis of plant communities in Inter-dune lowland in Hunshandak Sandy Land

LIU Hai-Jiang, GUO Ke* (LQVE, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2163~2169.

Abstract: Hunshandak Sandy Land is located in the south part of Xilingol League of Inner Mongolia (N 42°10'~43°50', E 112°10'~116°30'). It is about 260 km long from east to west, 30 to 100 km in width with the altitude ranging from 1100 to 1300 m. Sand dune and inter-dune lowland are the two main physiognomy types, which have a significant effect on the vegetation. The sharply heterogeneous environmental conditions result in the occurrence of diverse vegetation types including woodland, shrubs, steppes and meadows, although the typical zonal vegetation in this region is steppe.

A site that occupied some 2700 hm² was established to study dynamics of sandy land ecosystem and the restoration of degraded vegetation in the middle of Hunshandak Sandy Land in 2001. A vegetation survey was performed in the summer of 2002. The result indicates that the herbaceous communities were abundant in inter-dune lowland of this site. Grassland is important for local stockbreeding development, as it is the main mowing or grazing field for the people in Hunshandak Sandy Land. To well understand the main factors determining the structure and distribution pattern of herbaceous communities of this site, classification and ordination analysis were made by using the two-way indicator species analysis

基金项目:中国科学院知识创新工程重大资助项目(KSCX1-08); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043507)

收稿日期:2003-03-25; **修订日期:**2003-08-15

作者简介:刘海江(1978~), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事植被生态学研究。

* 通信作者 Author for correspondence, E-mail: guoke@ns.ibcas.ac.cn

Foundation item: Knowledge Innovation Project of CAS (KSCX1-08) and State Key Basic Research Development Planning Project of China (G1999043507)

Received date:2003-03-25; **Accepted date:**2003-08-15

Biography: Liu Haijiang, Master candidate, Main research field: vegetation ecology. E-mail: liuhj@ns.ibcas.ac.cn

(TWINSPAN) and the detrended correspondence analysis (DCA).

The result of classification indicates that all communities were classified into four groups. The first group was a type of relatively stable communities dominated by *Stipa grandis* and *Cleistogenes squarrosa*. The contents of its total nitrogen and organic matter of the soil were the highest among the four groups. The second one was dominated by *Agropyron cristatum*, with *Artemisia frigida*, *Cleistogenes squarrosa* and *Carex* sp. as common species. The contents of its total nitrogen and organic matter of the soil were relatively less than those of the first group. The third group was dominated by *Leymus chinensis* and *Leymus secalinus*, commonly with a few annual species, and had suffered heavy disturbance. The contents of its total nitrogen and organic matter of the soil were the lowest among the four groups. The fourth group was a type of meadow dominated by *Agrostis sibirica* and contents of its soluble sodium and potassium of the soil were highest. DCA ordination of those communities and correlation analysis with soil factors shows that the soluble sodium content and pH values of the soil significantly affected the distribution pattern of those communities. The communities were more distinct from each other along the gradient of soluble sodium content than along that of pH values. It was suggested that salinity of the soil might be the main factor affecting the structure and distribution pattern of those herbaceous communities in inter-dune lowland in the middle of Hunshandak Sandy Land.

Key words: Hunshandak Sandy Land; herbaceous communities; soil factor; classification; ordination

文章编号:1000-0933(2003)10-2163-07 中图分类号:Q149,Q948 文献标识码:A

浑善达克沙地地处内蒙古锡林郭勒盟南部,位于 $42^{\circ}10' \sim 43^{\circ}50'N$, $112^{\circ}10' \sim 116^{\circ}30'E$,呈东西伸长的椭圆形,东西长约260km,南北宽30~100km不等,是我国干草原带最大的一片沙地。全区海拔1100~1300m,地势由东南向西北倾斜。砂质或砂壤质的湖相沉积物经过风力的长期作用,形成了现在的地表景观,即沙丘和丘间低地有规律的交错结合,这对植被的分布有着很大影响。本区的地带性植被主要为典型草原,西部边缘有过渡性的荒漠草原。地带性土壤在东部为暗栗钙土,西部属于淡栗钙土,沙地土壤以风沙土为主,质地疏松,丘间低地有沙质浅色草甸土和盐土出现。由于区域水热差异,地质地貌特征及因此而引起的水分养分条件的变化,使得沙地植被类型多样化,有落叶林、疏林草原、灌丛、草原、低湿地草甸等植被类型^[1~4]。

在浑善达克沙地,丘间低地草场是当地主要的打草场和夏牧场,它的好坏优劣直接关系到当地经济的发展和牧民生活水平的提高。沙地生境的多样化导致了植被类型的多样化,在丘间低地也是如此。通过2001、2002年的实地调查,发现在地势相对一致的丘间低地上,草本植物群落类型多样,交错分布。不同的植物群落可能是由于局部环境的差异造成的,但要找出植物群落分布的规律,单用传统的定性描述的方法来解释比较困难,需借助数学模型把群落数据和环境因子结合起来进行综合分析,而排序方法在生态学中的广泛应用为解决上述问题提供了可能。排序是进行植被数量分析普遍使用的一种多元分析方法,用于研究植被、植物群落及植物种与环境之间的生态关系。许多研究已证明,排序能够比较客观地反映植物群落与环境的生态关系^[5~10]。有关分析浑善达克沙地植被与环境关系的文献资料很少,杨淑宽^[2,3]曾对浑善达克沙地的植被类型及植被与环境的关系做过简单的定性描述。本文利用双向指示种分析(TWINSPAN)和去趋势对应分析(DCA)两种常用的植被数量分析方法对浑善达克沙地丘间低地的草本植物群落进行分类和排序研究,力图揭示群落之间的关系及影响群落分布的主要环境因子,为管理及合理利用丘间低地草场提供科学依据。

1 研究方法 & 样品分析

1.1 研究地点

研究地点位于内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗贺日斯台苏木巴彦胡硕嘎查浑善达克沙地植被恢复与风沙环境综合治理试验示范研究区,地理坐标是 $42^{\circ}53.5' \sim 57'N$, $116^{\circ}01' \sim 08'E$,面积2700hm²,于2001年用围栏

围封。地貌为沙丘和丘间低地。根据正蓝旗气象局 1960 年到 1999 年 40a 的气象资料统计,该地区年平均降水量为 378mm,降水主要集中在 7、8、9 三个月,占全年降水总量的 64%。年平均风速为 4.4m/s。年平均气温为 1.8℃,7 月份平均温度为 18.7℃,1 月份平均温度为-17.9℃。

1.2 群落调查及土壤样品分析方法

在 2001 年示范区植被普查的基础上,于 2002 年 7 月下旬,对丘间低地的草本植物群落进行群落学调查,在各个群落的代表性地段选取样地并做 1m² 样方,共取得 22 个群落的样方数据。调查时记录每个样方的总盖度及样方内各物种的盖度、高度和地上生物量,同时取 3 个土样,土层分为(0~10cm、10~20cm、20~30cm)。植物样品在 80℃下烘 24h 后用天平(1mg)称重。风干土样经前期处理后过 2mm 的筛子,分成两部分,一部分用作物理分析,另一部分研磨后全部通过 100 目的筛子用作化学分析。土样测定项目包括酸碱度(pH)、全氮(TN)、有机质(ORG.)、可溶性钾(SK)和可溶性钠(SNa)。pH 值用电位法测定,全氮用凯氏定氮法测定,有机质用重铬酸钾氧化外加热法测定,可溶性钠和可溶性钾用火焰光度法测定^[11]。

1.3 数据处理

分类和排序分别用 TWINSpan 软件^[12]和 DECORANA 软件^[13],以样方中各物种的相对盖度(相对盖度=某一物种盖度/所有种盖度之和×100^[7])作为输入数据。数据统计分析用 SPSS(v10.0)软件。

2 研究结果

2.1 TWINSpan 分类结果(表 1)

第 1 组包含 2 个群落(1,10),为大针茅(*Stipa grandis*) + 糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落。群落盖度 45%~65%,地表没有流沙干扰且发育有结皮层,固定时间较长,基质稳定。

第 2 组包含 9 个群落(2,3,4,9,17,18,19,21,22),为冰草(*Agropyron cristatum*)群落。主要物种有冰草、冷蒿(*Artemisia frigida*)、糙隐子草、苔草(*Carex* sp.),群落组成物种较少,平均物种数为 6 个,垂直结构分为 3 层,冰草高约 50~70cm 为最上层,中间为冷蒿,高约 30~40cm,苔草、糙隐子草为第 3 层,高约 20~30cm。基质稳定,受流沙干扰小,此种类型在实验地的丘间低地占很大面积,比较稳定。

第 3 组包含 6 个群落(5,6,7,13,14,16),为羊草(*Leymus chinensis*) + 赖草(*Leymus secalinus*)群落。群落物种数少且主要为 1 年生物种,都受过大的干扰,编号为 13、14 的群落所在的位置在围封之前是夏季放牧的围羊地,其余 4 个群落为覆沙平地,呈斑块分布在滩地中,在大风盛行的冬春季节,流沙活动厉害,土壤表层有约 10cm 厚的流沙层,这种环境下不利于实生苗存活,而羊草和赖草依靠根茎从四周基质稳定的地方侵占这些覆沙斑块,形成羊草和赖草占优势的群落。

第 4 组包含 5 个群落(8,11,12,15,20),为西伯利亚剪股颖(*Agrostis sibirica*)群落。群落发育在水塘周围或地势稍微低洼的地方,属于草甸类型,植被盖度都在 85%以上,鹅绒委陵菜(*Potentilla anserine*)、金戴戴(*Halerpestes ruthenica*)、水麦冬(*Triglochin palustre*)等草甸种常见,群落结构、生产力都很稳定。优势物种在各组中出现的频率和平均生物量列在表 2 中,它们在各个组中是明显不同的。

表 1 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落的 TWINSpan 分类结果

Table 1 Classification of communities using TWINSpan in Inter-dune lowland in the middle of Hunshandak Sandy Land

组 Group	群落编号 Communities	优势物种 Dominant species
1	1, 10	大针茅 <i>Stipa grandis</i> 、糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>
2	2, 3, 4, 9, 17, 18, 19, 21, 22	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>
3	5, 6, 7, 13, 14, 16	羊草 <i>Leymus chinensis</i> 、赖草 <i>Leymus secalinus</i>
4	8, 11, 12, 15, 20	西伯利亚剪股颖 <i>Agrostis sibirica</i>

4 组植物群落的土壤特征存在明显差别。从图 1 可看出:组 1 的 3 个土层的全氮含量最高,组 3 的则最低,4 个组在不同土层上的土壤全氮含量的变化趋势基本一致,为组 1>组 4>组 2>组 3,只在第 3 层(20~30 cm)中组 2 的全氮含量稍微高于组 4 的;有机质含量的变化与全氮含量的变化基本一样,3 个土层基本上也为组 1>组 4>组 2>组 3。第 3 层(20~30cm)中组 2 的有机质含量高于组 4 的,这说明土壤中有机质和全氮具有相关性;土壤 pH 值变化范围在 7.5~8.5 之间,丘间低地土壤偏碱性,各组的 pH 值在 3 个土

层中差异较小,在第 2 层中组 1 的 pH 值明显高于其它 3 组,而组 1 和组 2 土壤的 pH 相对低;土壤可溶性钠含量在组 4 的 3 个土层中要远高于其它 3 组的,在第 1 层尤为明显,并且随土层深度增加含量逐渐降低,组 3 的可溶性钠含量则随土层深度增加而增加,可溶性钠在各个土层的变化趋势相一致,为组 4>组 3>组 1>组 2;组 4 群落的土壤可溶性钾的含量比较丰富,组 1、组 2 和组 3 的可溶性钾含量在表层土壤(0~10cm)中相一致,组 4 则比较高,4 个组在不同土层上土壤可溶性钾含量没有像全氮和有机质那样存在比较一致的变化趋势。

表 2 优势种在 4 个组中的平均生物量及出现频率

Table 2 Mean biomass and occurrence frequency of dominant species in the four groups

植物种 Plant species	Group 1 (N=2)		Group 2 (N=9)		Group 3 (N=6)		Group 4 (N=5)	
	B (g/m ²)	F (%)	B (g/m ²)	F (%)	B (g/m ²)	F (%)	B (g/m ²)	F (%)
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	36.71	100	20.42	100				
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	19.65	50	1.88	14	36.37	71		
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	7.08	100	89.80	86	7.14	14		
赖草 <i>Leymus secalinus</i>					31.38	57		
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	110.62	100						
西伯利亚剪股颖 <i>Agrostis sibirica</i>							179.28	75

N 群落数 Number of communities; B 生物量 Biomass; F 频度 Frequency of occurrence

2.2 DCA 排序结果

DCA 前 4 个排序轴的特征值为:0.850,0.527,0.199,0.090,贡献率为:0.51,0.316,0.119,0.05,前两轴的累积贡献率为 0.826,即前两轴可以代表 82.6% 的信息量。一般情况下,累积贡献率在 70% 以上,事物的基本面貌就可以得到反映^[14]。以前两个排序轴为坐标轴做群落排序值的散点图(图 2),再用 TWINSpan 分类结果划分排序空间,可看出 4 个组的界限相对明显,各有自己的分布中心和范围,排序图较好地反映了各组在排序空间的分布关系。

2.3 植物群落与环境的关系

DCA 第一、第二排序轴与土壤数据的 Pearson 相关分析表明(表 3),第一轴(AX1)与 pH1 和可溶性钠(SNa1,SNa2,SNa3)成显著负相关,其中,与土壤第 1、第 3 层的可溶性钠(SNa1, SNa3)达到极显著负相关($p=0.01,0.003$),第一排序轴在更大程度上反映土壤可溶性的梯度。第二排序轴(AX2)只与 pH2 正相关($p=0.049$)。两个排序轴只与可溶性钠和酸碱度达到显著相关,说明土壤可溶性钠和酸碱度(pH)是影响植物群落分布的两个主要因素。但从 4 个组在排序空间的分布情况看(图 2),4 个组在 DCA 第一轴上的分异要比第二轴的明显,说明可溶性钠对群落分布的影响更大。

3 讨论

3.1 群落 TWINSpan 分类

所有植物群落被分为 4 个组(表 1),代表 4 种物种组成和生境不相同的群落类型。第 1 组以大针茅和糙隐子草为优势种(表 1),群落平均有 10 多个物种,基质

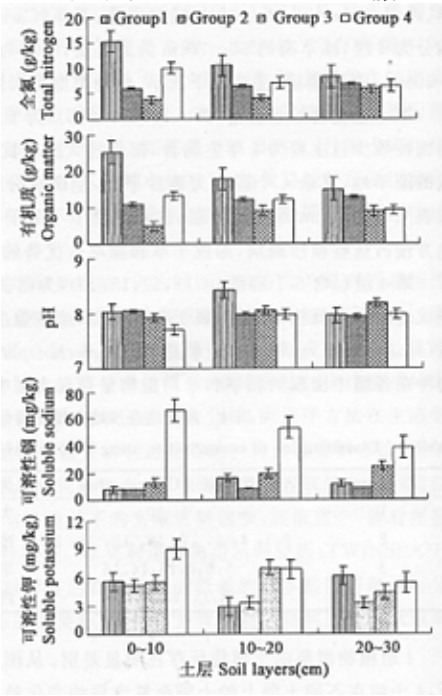


图 1 4 组群落的土壤特征(平均值±标准误)

Fig.1 Soil characteristics of the four groups of communities(mean±SE)

稳定,地表出现生物结皮,土壤有机质和全氮含量在四组群落中最高(图1)。浑善达克沙地处于干草原带典型草原区^[1-4],大针茅草原是地带性群落类型。因此第1组群落具有地带性特点,比较稳定,是沙地植被经过很长时间发展的结果。第2组群落以冰草为优势种,群落物种数较少,平均为6种,主要以冷蒿、糙隐子草、苔草为主,基质比较稳定,从群落发育程度来看,没有第1组群落成熟。第3组群落发育在曾经受过严重干扰的地段上,比如有流沙层覆盖或原来圈羊地周围,这些地段由于严重干扰,一般物种定居比较困难,而羊草、赖草依靠其独特的生长策略占据这些地段,形成羊草或赖草占绝对优势的群落,群落物种数少且大都为1年生物种,而且长势差,这类群落在丘间低地的流沙地上可能属于先锋群落类型。第4组群落是草甸群落,出现在水塘或低洼地周围,地下水埋深浅,物种大都是草甸常见种。土壤盐分含量在4组群落中最高,有机质和全氮含量也比较丰富(图1)。从四组群落在实验区的面积看,第2组群落所占面积最大,其他3组群落面积都比较少,尤其象第1组这样以前几乎没有被破坏的群落的面积更小。因为在2001年围封之前,实验区是当地牧民的夏营地,载畜量很高,处于过牧状态。第2组群落的大面积出现是由于偶然因素(比如干扰减轻,土壤肥力释放或遇上多雨年份)还是必然因素(植被发展的一个必然阶段)导致的,还需要进一步的研究。

表3 DCA排序轴与土壤特征之间的Pearson相关系数

	Table 3 Pearson correlation coefficients between soil characteristics and DCA ordination axes					
	TN1	TN2	TN3	ORG. 1	ORG. 2	ORG. 3
第一轴 AX1 No. 1 axis	-0.201	-0.141	0.114	-0.317	0.107	-0.057
<i>p</i>	0.382	0.542	0.613	0.161	0.645	0.802
第二轴 AX2 No. 2 axis	0.293	0.268	0.215	0.181	0.117	0.278
<i>p</i>	0.198	0.239	0.337	0.433	0.614	0.210
	pH1	pH2	pH3	SK1	SK2	SK3
第一轴 AX1 No. 1 axis	-0.526*	0.044	0.256	-0.195	0.061	-0.062
<i>p</i>	0.012	0.847	0.250	0.384	0.789	0.786
第二轴 AX2 No. 2 axis	0.080	0.424*	0.286	0.069	0.047	-0.163
<i>p</i>	0.723	0.049	0.198	0.760	0.836	0.469
	SNa1	SNa2	SNa3			
第一轴 AX1 No. 1 axis	-0.538**	-0.432*	-0.602**			
<i>p</i>	0.01	0.045	0.003			
第二轴 AX2 No. 2 axis	0.142	0.211	0.183			
<i>p</i>	0.528	0.345	0.416			

* $p < 0.01$ * $p < 0.05$; TN1, TN2, TN3; 3 层土样(0~10cm, 10~20cm, 20~30cm)的全氮; ORG. 1, ORG. 2, ORG. 3; 3 层土样的有机质; pH1, pH2, pH3; 3 层土样的酸碱度; SK1, SK2, SK3; 3 层土样的可溶性钾; SNa1, SNa2, SNa3; 3 层土样的可溶性钠。TN1, TN2, TN3: Total nitrogen content of the three soil layers (0~10cm, 10~20cm, 20~30cm); ORG. 1, ORG. 2, ORG. 3: Organic matter content of the three soil layers; pH1, pH2, pH3: pH values of the three soil layers; SK1, SK2, SK3: Soluble potassium content of the three soil layers; SNa1, SNa2, SNa3: Soluble sodium content of the three soil layers

植被分类是生态学的一个重要研究内容,并且随着数学、计算机技术在生态学研究中的应用,植被数量分类越来越受到重视。传统的植被分类以群落特征为依据,例如以群落外貌结构特征、植物种类组成、植被动态特征、生境特征中的某一个或几个指标作为分类标准对植被进行分类,不同的作者有不同的看法,

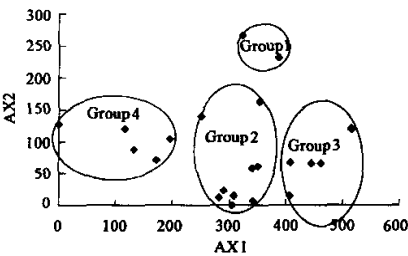


图2 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落 DCA 排序图

Fig. 2 DCA ordination graph of communities in inter-dune lowland in the middle of Hunshandak Sandy Land

所以产生了不同的分类原则和系统^[15],分类结果主要体现群落在结构、物种组成方面的特点,而且个人经验对分类结果的影响比较大。数量分类比如 TWINSpan 主要以群落数量特征为依据,分类结果比较客观,个人经验对分类结果影响小,从分类结果可以归纳总结出每类群落的环境特点,更能反映群落在适应环境方面的相似性。

3.2 群落 DCA 排序及影响群落分布格局的环境解释

DCA 排序空间能够反映群落在主要环境梯度上的分布,通过环境因子与排序轴的相关分析可以找出与排序轴显著相关的环境因子,这些环境因子就是影响群落分布格局的主要因素。分析表明:DCA 第一排序轴(AX1)与可溶性钠和 pH 成负相关,第二排序轴(AX2)与 pH 成正相关(表 3),说明可溶性钠和 pH 是影响群落分布的两个主要因素。土壤的 pH 值受很多因素影响,其中土壤盐碱化程度是一个很重要的影响因素,土壤盐碱化程度高,pH 也相应的高,所以 DCA 第一排序轴代表可溶性钠的梯度要比代表 pH 的梯度更有意义,即第一排序轴主要表示土壤盐分梯度。表 3 中 AX1 与可溶性钠的相关系数的 p 值分别为 0.01、0.045、0.003,而 AX1 只与表层土壤(0~10cm)pH 值显著相关,相关系数的 p 值为 0.012,也说明可溶性钠对群落的影响要比 pH 的大。

DCA 第一排序轴(AX1)与可溶性钠成负相关,因此排序图中土壤盐分含量在第一排序轴上有这样的趋势,左边的群落其土壤盐分含量比较高,而右边的则比较低。组 4 的群落为草甸群落,土壤可溶性钠和钾含量都很高(图 1),土壤盐分含量高,在排序图中位于排序轴的最左边(图 2)。组 3 的群落由于受到流沙覆盖,流沙渗透性比较强,土壤水分蒸发减少,表层土壤聚集少,土壤盐分含量比较低,位于排序轴的右边(图 2)。组 1 和组 2 的群落虽然它们之间存在比较明显的差别,但都是比较稳定的植被类型,土壤发育较好,盐分含量不高,在 AX1 上都位于组 4 和组 3 之间(图 2)。图 2 所反映的群落在盐分梯度上的分布与群落实际生境情况相一致,说明排序能够客观的反映群落与环境的关系。

一些研究已经证明:植被对环境因子的响应导致植物群落的物种组成和多度沿生境梯度发生显著的变化,产生明显的地带性植被模式^[16,17]。而对一个地形开阔,海拔高度差异不大的小区域来说,降水和空气湿度没有明显的地域差异,它们不再是决定该区域植物群落分异的主导因素;相反,土壤盐分、pH 值、有机质含量和其它理化特性的异质性往往是决定植物群落组成、结构和分布格局形成的主要因素^[18~21]。本研究区域为丘间低地,在当地称为塔拉地,蒙古语意思为平坦开阔的地方,没有象沙丘那样明显的地貌差别,空间尺度又比较小,海拔高度、降水、温度没有差异,影响植物群落分布格局的主导因素可能是土壤因素。研究结果表明,土壤的可溶性钠和酸碱度是影响研究地区群落分布的主要因素。与以前的研究结论相一致。在丘间低地的低洼地段或靠近水塘的地方,地下水位较高,水分在毛细管力作用下可以到达地表,沙地地表水分蒸发强烈,水分蒸发后盐分在地表聚集,而造成表土盐碱化程度高。而在有较厚沙层或流沙覆盖的地段,由于沙土中粉粒、粘粒含量低,土壤持水能力差,渗透性强,毛细管水不能到达地表,水分蒸发减少,地表盐分聚集少,表层土壤盐碱化程度低^[22]。这样在丘间低地就出现了土壤盐分含量不同的斑块,而对土壤盐分有不同适应程度的物种就会相应出现,形成了不同类型的群落。

References:

- [1] Integrated Scientific Expedition to Inner Mongolia and Ningxia of the Chinese Academy of Sciences. *Vegetation of Inner Mongolia*. Beijing: Science Press, 1985. 764~792.
- [2] Yang S K, Chen J S, Guo X M. *Expedition in Xiao Tenger Sandy Land in Inner Mongolia. Research of Sand-controlling*, Beijing: Science Press, 1962. 3: 144~151.
- [3] Yang S K. Vegetation of Xiao Tengerli Sandy Land in Inner Mongolia. *Geographical Research*, 1964, 8: 32~46.
- [4] Li S, Sun W, Li X Z, et al. Sedimentary characteristics and environmental evolution of Otindag Sandy Land in Holocene. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(4): 323~331.
- [5] Zhang J T. Analysis of relationships between vegetation and its environmental variables I. DCA ordination. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 1992, 15(2): 182~189.
- [6] Zhang J T. Ordination axes partitioning and its application. *Chinese Journal of Ecology*, 1994, 13 (3): 73~75.
- [7] Zhang J T. *Methods in Quantitative Vegetation Ecology*. Beijing: Chinese Scientific & Technological Press, 1995.

- 139~144, 217~226.
- [8] Zhang F, Zhang J T. Research progress of numerical classification and ordination of vegetation in China. *Journal of Shanxi University* (Natural Science Edition), 2000, **23** (3): 278~282.
- [9] Lou A R. Ecological gradient analysis and environmental interpretation of mountain vegetation in the middle stretch of TianShan Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22** (4): 364~372.
- [10] Li Y Y. The multivariate analysis methods applying in the domain of ecology. *Journal of Guizhou University* (Agriculture and Biological Science), 2002, **21** (3): 215~218.
- [11] Liu G S. *Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles*. Beijing: China Standards Press, 1996. 24~33, 47~48.
- [12] Hill M O. TWINSpan-A FORTRAN Program for Arranging Multivariate Data in an Ordered Two-way Table by Classification of the Individuals and Attributes. Ithaca, Cornell University, 1979b.
- [13] Hill M O. DECORANA-A FORTRAN Program for Detrended Correspondence Analysis and Reciprocal Averaging. Ithaca, Cornell University, 1979a.
- [14] Xu K X. *Biomathematics*. Beijing: Science Press, 2001. 58~64.
- [15] Song Y C. *Vegetation Ecology*. Shanghai: East China Normal University Press, 2001. 297~322.
- [16] Henriques R P B, Hay J D. The plant communities of a foredune in southeastern Brazil. *Can. J. Bot.*, 1998, **76**: 1323~1330.
- [17] Goldsmith F B. The vegetation of exposed sea cliffs at South Stack, Angsley I. The multivariate approach. *J. Ecol.*, 1973, **61**: 787~818.
- [18] Kutiel P. Slope aspect effect on soil and vegetation in a Mediterranean ecosystem. *Israel Journal of Botany*, 1992, **41**: 243~250.
- [19] Monson R K, Smith S D, Gehring J L, et al. Physiological differentiation within an *Encelia farinosa* population along a short topographic gradient in the Sonoran Desert. *Functional Ecology*, 1992, **6**: 751~759.
- [20] Montana C. A floristic-structural gradient related to land forms in the southern Chihuahuan Desert. *Journal of Vegetation Science*, 1990, **1**: 669~674.
- [21] Chen Y F, Song M H, Dong M. Spatial pattern of the plant community along a sand covered hillslope in Ordos Plateau of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26** (4): 501~505.
- [22] Guo K, Dong X J, Liu Z M. Characteristics of soil moisture content on sand dunes in MU US Sandy Grassland, why *Artemisia ordosica* declines on old fixed sand dunes. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24** (3): 275~279.

参考文献:

- [1] 中国科学院内蒙古宁夏综合科考队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985. 764~792.
- [2] 杨淑宽, 陈静生, 郭蓄民. 内蒙古小腾格里沙漠考察. 治沙研究. 北京: 科学出版社, 1962. **3**: 144~151.
- [3] 杨淑宽. 内蒙古小腾格里沙地的植被. 地理集刊, 1964, **8**: 32~46.
- [4] 李森, 孙武, 李孝泽, 等. 浑善达克沙地全新世沉积特征与环境演变. 中国沙漠, 1995, **15** (4): 323~331.
- [5] 张金屯. 植被与环境关系的分析 I: DCA 排序. 山西大学学报(自然科学版), 1992, **15** (2): 182~189.
- [6] 张金屯. 排序轴分类法及其应用. 生态学杂志, 1994, **13** (3): 73~75.
- [7] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 139~144, 217~226.
- [8] 张峰, 张金屯. 我国植被数量分类和排序研究进展. 山西大学学报(自然科学版), 2000, **23** (3): 278~282.
- [9] 娄安如. 天山中段山地植被的生态梯度分析及环境解释. 植物生态学报, 1998, **22** (4): 364~372.
- [10] 李援越. 多元分析法在生态学研究中的应用. 贵州大学学报(农业与生物科学版), 2002, **21** (3): 215~218.
- [11] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. 24~33, 47~48.
- [14] 徐克学. 生物数学. 北京: 科学出版社, 2001. 58~64.
- [15] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001. 297~322.
- [21] 陈玉福, 宋明华, 董鸣. 鄂尔多斯高原覆沙坡地植物群落格局. 植物生态学报, 2002, **26** (4): 501~505.
- [22] 郭柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点——兼论老固定沙地上油蒿衰退原因. 植物生态学报, 2000, **24** (3): 275~279.