

科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系

左小安, 赵学勇, 赵哈林, 李玉强, 郭轶瑞, 赵玉萍
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所奈曼沙漠化研究站, 兰州 730000)

摘要: 研究了科尔沁沙地 6 个典型生境类型的沙质草地群落物种多样性与生产力的变化, 分析了植物群落格局、物种多样性、生产力与土壤特性的关系。结果表明, 从湿草甸向干草甸、固定沙丘、半固定沙丘、半流动沙丘和流动沙丘退化过程中, 群落生产力逐渐下降; 群落物种多样性先增加后减小, 表现出由湿生化和土壤贫瘠化生境向中生、中旱生生境逐渐增加的趋势; 土壤极细沙和粉粒含量逐渐递减, 土壤有机碳和全氮含量、电导率逐渐递减。典范对应分析(CCA)表明, 土壤有机碳、全氮、有效氮、有效钾、土壤含水量、酸碱度和盐分含量的变化共同影响植物群落分布格局, 其解释总方差为 40%, 其中土壤养分梯度是沙质草地群落分布格局的主要土壤限制因子。沙质草地植物群落的生态优势度、物种多样性指数分别与土壤养分梯度和水盐及酸碱因子二元指标之间存在显著的二元线性关系。沙质草地群落物种多样性变化受土壤养分、水盐及酸碱度因子的共同影响。多元回归模型分析表明, 土壤养分对生物量的贡献率为 86.73%, 明显大于水盐及酸碱度对群落生产力的影响。

关键词: 沙质草地群落; 物种多样性; 生产力; 土壤理化性质; 典范对应分析
中图分类号: X171.1; Q948 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)05-0945-07

Changes of Species Diversity and Productivity in Relation to Soil Properties in Sandy Grassland in Horqin Sand Land

ZUO Xiao-an, ZHAO Xue-yong, ZHAO Ha-lin, LI Yu-qiang, GUO Yi-rui, ZHAO Yu-ping
(Naiman Desertification Research Station, Cold and Arid Regions of Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This study provided the analysis of changes of species diversity and productivity in relation to soil properties in six typical habitats (wet meadow, dry grassland, fixed dune, semi-fixed dune, semi-shifted dune, and shifted dune) in Horqin Sand Land. The changes of vegetation and soil properties, following the degraded process of sandy grassland, show the following trends: ① productivity decreases gradually, ② species diversity changes in a pattern of near-normal distribution, firstly increases from wet meadow, dry grassland, to fixed dune (at the peak), and then decreases from semi-fixed dune, semi-shifted dune, to shifted dune, while ③ contents of soil fine sand, silt, soil organic carbon, total nitrogen, and electrical conductivity, decrease consistently. Ordination technique of canonical correspondence analysis (CCA) was used to examine the relationship between the vegetation pattern and soil parameters. Results show that soil organic carbon, total nitrogen, available nitrogen, available potassium, soil water content, pH and electrical conductivity are main factors of vegetation pattern in this area. These factors are closely related to the first two canonical axes, accounting for 40% of the species-soil properties relationship, and soil nutrient is the key factor for determining the distributions of the major vegetation type and pattern. Furthermore, the correlation between species diversity or ecological dominance of the communities and gradient of soil factors is significant, shows that changes of species diversity and productivity are affected by soil nutrients, soil water content, pH and electrical conductivity. The regression model of productivity and soil property reveals that soil nutrient is the key factor to community productivity, accounting for 86.73% of the relationship between productivity-soil properties.

Key words: sandy grassland community; species diversity; productivity; soil physico-chemical properties; canonical correspondence analysis (CCA)

生物多样性、生产力与环境因子的关系是生态学研究的热点和重要内容之一^[1~7]。近年来, 围绕生物多样性、生产力与环境因子的关系, 国内外开展了一系列讨论, 其中研究较多的是物种多样性、生产力与纬度、海拔等相应的光照和水热因子变化的关系^[1,5]。植物的生长发育与土壤因子关系较为密切, 土壤理化性质的不同、土壤母质的好坏, 都可能影响群落结构、物种多样性和生产力水平。有关生物

多样性、生产力与土壤因子关系的研究多涉及森林群落^[8]、草原群落^[1,3,9]、高寒草甸^[10]和盐沼沙生植被^[11], 对荒漠地区植被的土壤因子与物种多样性、生产力关系的研究较少。科尔沁沙地是我国北方半

收稿日期: 2006-07-05; 修订日期: 2006-10-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(40601008, 40471004); 中国科学院野外台站基金项目(1731690200015)
作者简介: 左小安(1978~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为干旱区生态格局与过程, E-mail: xazuo@126.com

干旱农牧交错带的典型生态脆弱区,近代,由于人为过度的放牧、开垦、樵柴,致使其原始景观疏林草原植被遭到严重破坏,出现不同程度的植被退化和土地沙漠化,植被破坏严重,土地生产力急剧下降,为此前人已做了大量的研究工作^[12~19],但涉及到讨论群落物种多样性、生产力与土壤特性定量关系的研究鲜见报道.因此,本研究应用定量分析方法探讨科尔沁沙质草地群落分布格局、物种多样性、生产力与土壤因子的关系,了解草地退化及沙漠化过程中植被演替与土壤演变的关系及其机制,以期为该地区沙漠化的防治及植被的恢复提供理论依据.

1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地中南部的奈曼旗境内.地理位置120°55'E,42°41'N,平均海拔360 m.该区域属温带半干旱大陆性季风气候,年均温6.4℃,≥10℃年积温在3 000℃以上,无霜期约150 d.年均降水量364.6 mm,主要集中在6~8月,年均蒸发量1 972.8 mm.土壤类型主要有风沙土、草甸土、沙质栗钙土和沼泽土^[18].气候特征是冬、春季干旱,多大风,降雨集中在夏季,水热同期,有利于植物生长.地貌类型以固定沙地、半流动沙地、流动沙地和开阔的大片甸子地相间分布为特征.植被的斑块化分布和空间异质性较强,优势植物种有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、欧亚旋覆花(*Convolvulus chinensis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等.

2 研究方法

2.1 样地调查

调查取样时间为2005-08.在奈曼旗中部的尧勒甸子村——孟和农牧过渡区内,采取格局梯度法,选取处在禁牧过程中的200 m×200 m的流动沙丘、半流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、干草甸和湿草甸在内的17个典型植物草本群落样地,进行植被、环境特征调查.每个样地分别随机设置1 m×1 m的样方10个,测定样方内各种植物的盖度、多度、高度特征,并用收获法调查测定草本、灌木、凋落物和地上生物量.在收获后的每个样方内,采用环刀法测定土壤容重(BD);用烘干法测定土壤含水量(SW);用直径为4 cm的土钻机钻取3个0~20 cm的混合土样,

按常规方法做土壤机械组成、电导率(EC)、pH、有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)、全钾(K)、有效氮(AN)、有效磷(AP)和有效钾(AK)测定^[20].

2.2 数据分析

2.2.1 物种多样性的分析

应用物种重要值=(相对高度+相对盖度+相对多度)/3,计算物种的生态重要值.通过选用物种丰富度指数(C)、Simpson指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H)和Pielou均匀度指数(J)4类来计算群落的物种多样性^[16],

(1) 物种丰富度指数(C):

$$C = \sum_{i=1}^S S_i$$

(2) Simpson指数(D):

$$D = \sum_{i=1}^S N_i^2$$

(3) Shannon-Wiener多样性指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^S N_i \ln N_i$$

(4) Pielou均匀度指数(J):

$$J = H/\ln S$$

式中, N_i 为种 i 相对重要值, N 为群落物种的总个体数, S 为群落物种数.

2.2.2 植物群落与环境因子的排序分析

应用Conoco 4.5软件对植物群落的物种重要值和土壤因子组成的数据矩阵,进行典范对应分析(CCA).统计分析的结果用样地-环境因子直接排序图表示.根据排序图上群落样点与土壤理化性质间的位置关系,群落物种重要值和排序轴间的相关性大小,定量分析科尔沁沙质草地物种分布格局与土壤因子之间的相互关系.

3 结果与分析

3.1 沙质草地群落物种多样性和生产力的变化

物种多样性测度结果表明(表1),研究的6个生境群落物种多样性变化表现为3个层次.第1个层次具有较高的物种丰富度、均匀度和多样性,是以冷蒿为建群种的群落(7、8)、画眉草为建群种的群落(6、10)和马唐+扁蓿豆群落(9)为主的固定沙丘植被以及扁蓿豆为建群种的群落(11、12)为主的半固定沙丘植被.第2个层次具有中等的物种丰富度、均匀度和多样性,是以黄蒿为建群种的群落(4、5)和糙隐子群落(3)为主的干草甸植被和以苦卖菜为建群种的群落(13、14)为主的半流动沙丘植被.第3个

层次具有较低的物种丰富度、多样性和均匀度,是以虎尾草为建群种的群落(1、2)为主的湿草甸植被和沙米群落(15)、旋覆花群落(16)和苦苣菜群落(17)为主的流动沙丘植被.沙质草地群落物种多样性的变化表现出由湿生化和土壤贫瘠化生境向中生、中旱生生境逐渐递增的趋势.由表 1 看出,沙质草地群落生产力变化表现出由湿草甸向流动沙丘退化过程中依次递减的趋势,下降幅度达到 90.29%.

表 1 沙质草地群落物种丰富度、多样性和地上生物量¹⁾

Table 1 Richness, diversity and biomass of sandy grassland community							
群落号	草地类型	C	D	H	J	地上生物量/g·m ⁻²	土壤水分/%
虎尾草 + 赖草 <i>Chloris virgata</i> + <i>Leymus secalinus</i>	湿草甸	11	0.72	1.75	0.73	474.71 ± 13.78	5.52 ± 1.28
虎尾草 + 寸草苔 <i>Chloris virgata</i> + <i>Carex duriuscula</i>	湿草甸	12	0.62	1.53	0.62	405.67 ± 90.29	7.02 ± 0.85
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	干草甸	13	0.78	1.81	0.71	227.08 ± 27.75	5.56 ± 1.14
黄蒿 + 狗尾草 <i>Artemisia scoparia</i> + <i>Setaria viridis</i>	干草甸	14	0.83	2.10	0.80	141.74 ± 8.86	3.52 ± 0.48
黄蒿 + 芦苇 <i>Artemisia scoparia</i> + <i>Phragmites communis</i>	干草甸	15	0.78	1.99	0.73	183.74 ± 10.92	5.25 ± 0.38
画眉草 + 冷蒿 <i>Eragrostis pilosa</i> + <i>Artemisia frigida</i>	固定沙丘	21	0.88	2.41	0.79	182.40 ± 2.55	3.11 ± 0.23
冷蒿 + 地锦 <i>Artemisia frigida</i> + <i>Euphorbia humifusa</i>	固定沙丘	18	0.90	2.47	0.85	144.34 ± 7.54	2.88 ± 0.21
冷蒿 + 狗尾草 <i>Artemisia frigida</i> + <i>Setaria viridis</i>	固定沙丘	21	0.88	2.53	0.83	172.28 ± 22.22	3.17 ± 0.26
马唐 + 扁蓿豆 <i>Digitaria ciliaris</i> + <i>Melissitus ruthenicus</i>	固定沙丘	20	0.91	2.63	0.88	150.41 ± 21.14	3.76 ± 0.21
五星蒿 + 画眉草 <i>Bassia dasyphylla</i> + <i>Eragrostis pilosa</i>	固定沙丘	18	0.83	2.23	0.77	191.48 ± 15.65	3.34 ± 0.15
扁蓿豆 + 差巴嘎蒿 <i>Melissitus ruthenicus</i> + <i>Artemisia halodendrom</i>	半固定沙丘	15	0.85	2.15	0.79	136.98 ± 21.76	3.10 ± 0.30
扁蓿豆 + 马唐 <i>Melissitus ruthenicus</i> + <i>Digitaria ciliaris</i>	半固定沙丘	17	0.87	2.35	0.83	205.38 ± 18.14	2.90 ± 0.73
苦卖菜 + 芦苇 <i>Ixetis denticulate</i> + <i>Phragmites communis</i>	半流动沙丘	14	0.83	2.03	0.77	133.97 ± 20.06	3.86 ± 0.53
苦卖菜 + 差巴嘎蒿 <i>Ixetis denticulata</i> + <i>Artemisia halodendrom</i>	半流动沙丘	11	0.75	1.77	0.74	59.09 ± 19.17	3.23 ± 0.26
沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	流动沙丘	5	0.48	0.97	0.60	30.18 ± 14.69	3.47 ± 0.54
旋覆花 <i>Inula salsoloides</i>	流动沙丘	7	0.73	1.46	0.75	66.21 ± 7.34	3.77 ± 0.45
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	流动沙丘	6	0.62	1.28	0.71	46.20 ± 9.20	3.79 ± 0.38

1) 表中生物量、土壤水分数值为平均值 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)

3.2 沙质草地土壤的理化性质

从表 2 可以看出,土壤水分含量表现出,由湿草甸向干草甸、流动沙丘、固定沙丘、半流动沙丘和半固定沙丘依次递减的趋势.但是,随着生境由湿草甸、干草甸、固定沙丘、半固定沙丘、半流动沙丘退化到流动沙丘的过程中,沙地表层土壤的容重波动增加,地表紧实度依次下降;在机械组成中,从干草甸到流动沙丘,0.05 ~ 0.10 mm 的极细沙和 0.02 ~ 0.05 mm 的粉粒含量逐渐递减,粘粒(< 0.002 mm)波动递减,细沙(0.10 ~ 0.25 mm)和中沙(0.25 ~ 0.50 mm)含量波动增加.湿草甸的极细沙和粉粒含量低于干草甸,但高于各类型沙丘;细沙和中沙含量要高于干草甸、低于各类型沙丘;粘粒含量在各生境类型中最高.

沙质草地土壤的化学性质表现出(表 3),随着

生境由湿草甸向流动沙丘退化过程中,土壤有机碳和全氮含量、电导率逐渐递减,全磷、有效氮、有效磷和有效钾含量波动递减.其中,有机碳递减最快的为半流动沙丘到流动沙丘,下降幅度为 51.96%;其次是固定到半固定沙丘、干草甸到固定沙丘、半固定沙丘到半流动沙丘、湿草甸到干草甸,下降幅度分别是 51.19%、46.84%、37.80%、21.78%;全氮递减速度大小顺序为:固定沙丘到半固定沙丘 > 干草甸到固定沙丘 > 半固定到半流动 > 湿草甸到干草甸 > 半流动沙丘到流动沙丘,递减幅度依次为 32.26%、31.11%、28.57%、18.18%、13.33%;全磷递减速度大小顺序为:干草甸到固定沙丘 > 半流动到流动沙丘 > 固定到半固定 > 半固定到半流动,递减幅度依次为 51.28%、33.33%、26.31%、14.29%.

表 2 沙质草地土壤的物理特征($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Soil physical characteristics of sandy grassland($\bar{x} \pm s$)									
草地类型	土壤水分 /%	容重 /g·cm ⁻³	地表紧实度 /kg·m ⁻²	土壤粒级分布/%					
				0.50 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.10 mm	0.10 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	< 0.002 mm
湿草甸	6.27 ± 1.06	1.58 ± 0.08	1.91 ± 0.15	28.87 ± 1.53	48.14 ± 6.87	8.91 ± 0.21	7.22 ± 3.08	3.18 ± 1.95	2.94 ± 0.31
干草甸	4.78 ± 1.10	1.51 ± 0.45	1.70 ± 0.35	16.31 ± 8.95	28.06 ± 14.51	28.00 ± 9.98	20.46 ± 11.50	3.87 ± 1.97	2.37 ± 0.34
固定沙丘	3.25 ± 0.33	1.59 ± 0.01	1.68 ± 0.75	29.99 ± 7.15	54.06 ± 6.11	7.7 ± 2.67	3.99 ± 1.65	1.34 ± 0.61	2.58 ± 0.42
半固定沙丘	3.00 ± 0.10	1.59 ± 0.02	1.28 ± 0.85	36.78 ± 0.62	48.73 ± 0.86	6.89 ± 0.15	3.14 ± 0.09	1.89 ± 0.06	2.68 ± 0.15
半流动沙丘	3.23 ± 0.10	1.62 ± 0.02	1.10 ± 0.90	38.53 ± 1.15	53.44 ± 0.95	3.09 ± 0.10	1.33 ± 0.67	1.44 ± 0.20	2.29 ± 0.07
流动沙丘	3.67 ± 0.18	1.64 ± 0.01	0.80 ± 0.43	33.35 ± 5.81	61.66 ± 4.76	0.96 ± 0.42	0.90 ± 0.67	0.53 ± 0.30	1.98 ± 0.04

表 3 沙质草地土壤的化学特征($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Soil chemical characteristics of sandy grassland($\bar{x} \pm s$)

草地类型	pH (H ₂ O)	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	C / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	N / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	P / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	K / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	AN / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	AP / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	AK / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
湿草甸	9.07 ± 0.30	126.50 ± 30.20	8.08 ± 2.45	0.55 ± 0.13	0.26 ± 0.06	28.75 ± 1.77	22.10 ± 1.84	9.43 ± 0.57	145.00 ± 7.07
干草甸	8.28 ± 0.16	69.33 ± 28.04	6.32 ± 0.81	0.45 ± 0.05	0.39 ± 0.12	29.17 ± 4.76	20.63 ± 4.54	7.00 ± 2.20	86.67 ± 5.77
固定沙丘	8.04 ± 0.13	31.80 ± 2.59	3.36 ± 0.31	0.31 ± 0.02	0.19 ± 0.02	25.00 ± 8.47	15.10 ± 1.13	13.84 ± 3.27	110.00 ± 14.14
半固定沙丘	7.91 ± 0.04	29.33 ± 0.58	1.64 ± 0.25	0.21 ± 0.03	0.14 ± 0.01	28.33 ± 1.44	9.14 ± 0.83	8.45 ± 2.08	86.67 ± 0.02
半流动沙丘	8.28 ± 0.01	28.00 ± 0.02	1.02 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.12 ± 0.02	29.16 ± 1.44	6.23 ± 0.21	8.69 ± 0.55	70.00 ± 0.01
流动沙丘	7.96 ± 0.17	19.67 ± 2.89	0.49 ± 0.11	0.13 ± 0.01	0.08 ± 0.01	27.50 ± 0.00	7.70 ± 0.96	8.21 ± 0.61	50.00 ± 0.00

3.3 沙质草地群落分布与土壤因子的相互关系

3.3.1 沙质草地群落土壤因子的相关分析

从表 4 可以看出,土壤有机碳与全氮、全磷、有效氮、有效钾、粘粒含量、pH、电导率和土壤水分含量呈明显的正相关关系($p < 0.01$),与沙粒含量和土

壤容重呈显著的负相关关系($p < 0.01$).沙粒含量与土壤有机碳、全氮、全磷、有效氮和粘粒含量呈显著的负相关关系($p < 0.01$),与容重呈显著的正相关关系($p < 0.01$).土壤含水量与有机碳、pH 和电导率呈明显的正相关关系($p < 0.01$).

表 4 沙质草地群落土壤理化性质间、理化性质与物种多样性和生物量的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation among soil physico-chemical properties, diversity and productivity of sandy grassland community

	W	D	H	pH	EC	BD	SM	C	N	P	K	AN	AP	AK	Sand	Silt	Clay
W	1.00																
D	0.01	1.00															
H	0.10	0.96**	1.00														
pH	0.84**	-0.25	-0.20	1.00													
EC	0.87**	-0.19	-0.14	0.91**	1.00												
BD	-0.27	-0.25	-0.27	-0.15	-0.30	1.00											
SM	0.74**	-0.37	-0.39	0.90**	0.93**	-0.31	1.00										
C	0.80**	0.10	0.17	0.72**	0.84**	-0.61**	0.75**	1.00									
N	0.68**	0.21	0.28	0.55*	0.66**	-0.72**	0.59*	0.95**	1.00								
P	0.21	0.23	0.25	0.15	0.34	-0.89**	0.34	0.69**	0.80**	1.00							
K	0.16	-0.25	-0.22	0.32	0.23	-0.09	0.33	0.16	0.11	0.08	1.00						
AN	0.71**	0.11	0.21	0.59*	0.74**	-0.63*	0.67*	0.95**	0.96**	0.76**	0.11	1.00					
AP	-0.31	0.35	0.40	-0.36	-0.45	0.22	-0.58*	-0.27	-0.19	-0.12	-0.43	-0.20	1.00				
AK	0.80**	0.30	0.44	0.56*	0.52*	-0.21	0.32	0.66**	0.64**	0.15	-0.14	0.60*	0.14	1.00			
Sand	-0.32	-0.07	-0.08	-0.34	-0.55*	0.80**	-0.57*	-0.73**	-0.76**	-0.93**	-0.25	-0.78**	0.37	-0.07	1.00		
Silt	0.26	0.09	0.09	0.28	0.50*	-0.81**	0.52*	0.69**	0.71**	0.93**	0.23	0.73**	-0.34	0.03	-0.99**	1.00	
Clay	0.60*	-0.33	-0.28	0.57*	0.58*	0.24	0.59*	0.28	0.16	-0.25	-0.02	0.25	-0.33	0.32	0.07	-0.15	1.00

1) W: 地上生物量; D: Simpson 指数; H: Shannon-Wiener 指数; pH: 酸碱度; EC: 电导率; BD: 容重; SM: 土壤水分含量; C: 土壤有机碳; N: 土壤全氮; P: 土壤全磷; K: 土壤全钾; AN: 土壤有效氮; AP: 土壤有效磷; AK: 土壤有效钾; Sand: 沙粒含量; Silt: 粉粒含量; Clay: 粘粒含量; * 表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$

3.3.2 沙质草地群落与土壤因子的典范对应分析

在 Canoco 软件中,以群落中的物种重要值和土壤理化性质为数据源,构成种类与土壤因子数据矩阵,应用典范对应分析(CCA)方法进行排序分析,得到 CCA 二维排序图(图 1).该二维排序结果能反映 17 个群落在土壤因子梯度上的分布规律.在排序图中,箭头表示土壤环境因子,箭头连线的长短表示植物群落的分布与该土壤因子相关性的 大小,箭头连线在排序中的斜率表示土壤因子与排序轴相关性的 大小,箭头所处的象限表示土壤因子与排序轴之间

相关性的正负.

从表 5 和图 1 中可以看出,土壤有机碳、全氮、有效氮和有效钾与第 1 排序轴相关性较大,相关系数依次为 -0.79、-0.80、-0.74、-0.80,第 1 轴基本上反映各植物群落所在土壤养分梯度上的变化趋势,即沿 CCA 第 1 轴从左到右,随着生境由湿草甸、干草甸、固定沙丘、半固定沙丘、半流动沙丘向流动沙丘退化,土壤养分含量逐渐降低.与第 2 排序轴相关系数较大的为土壤水分含量(0.77)、pH(0.77)和电导率(0.71),说明第 2 轴基本上反映了群落沿土

壤水分、盐含量和酸碱度的变化趋势,但是由于生境的复杂性,该梯度变化的趋势并不明显.第1轴特征值为0.64、解释方差为22%,第2轴特征值为0.52、解释方差为18%,说明土壤养分对沙质草地群落分布格局影响要大于水盐和酸碱度,成为沙质草地群落分布格局的主要土壤限制因子.

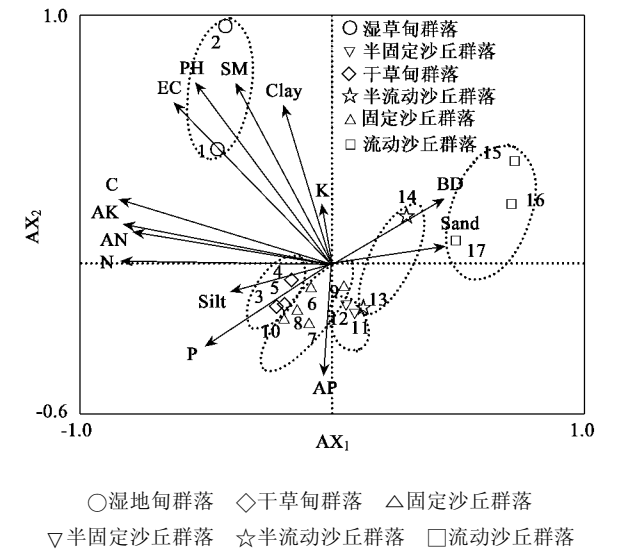


图1 沙质草地群落与土壤因子的 CCA 分析

Fig.1 CCA analysis between community and soil factors in sandy grassland

表5 沙质草地群落内土壤因子与物种排序轴的相关系数、特征值和解释方差

项目	排序轴			
	SPX ₁	SPX ₂	SPX ₃	SPX ₄
pH	-0.47	0.77	0.04	0.24
电导率(EC)	-0.56	0.71	0.23	0.22
容重(BD)	0.45	0.19	-0.34	-0.22
土壤含水量(SM)	-0.34	0.77	0.34	0.27
有机碳(C)	-0.79	0.36	0.40	0.00
全氮(N)	-0.80	0.12	0.46	-0.07
全磷(P)	-0.50	-0.24	0.62	0.10
全钾(K)	-0.02	0.24	0.03	0.17
有效氮(AN)	-0.74	0.24	0.50	-0.16
有效磷(AP)	-0.07	-0.45	-0.36	-0.35
有效钾(AK)	-0.80	0.23	-0.26	-0.23
沙粒含量(Sand)	0.43	-0.01	-0.69	-0.25
粘粒含量(Silt)	-0.39	-0.04	0.68	0.29
粉粒含量(Clay)	-0.13	0.65	0.01	-0.04
特征值	0.64	0.52	0.40	0.29
物种与环境相关系数	0.98	0.99	1.00	0.97
解释方差1%	22.0	40.0	54.0	64.0

3.4 沙质草地群落物种多样性与土壤因子梯度的关系

植物群落的物种多样性指数(H)和生态优势度指数(D),是定量描述群落的结构和功能的2个生态学指标.因此,为了进一步数量化地揭示植物群落和土壤因子的关系,本研究选择了物种多样性与生态优势度这2个指标,研究科尔沁沙质草地植物群落与土壤因子梯度的关系.群落物种多样性、生态优势度与土壤因子相关性(表4),表明每个土壤因子与群落结构特征在这2个指标之间没有显著的相关性.

由17个群落 CCA 排序的 $AX_1(X_1)$ 和 $AX_2(X_2)$ 轴的排序值所对相应的物种多样性(H)和生态优势度(D)的回归分析结果见表6.

表6 植物群落的轴与物种多样性的回归分析

Table 6 Regression analysis between CCA taxis values and species diversity of plant communities

多样性指数	因子	回归系数		R^2	p	n
		B_0	B_1			
D	X_1	0.79	-0.05	0.23	0.053	17
	X_2	0.79	-0.07	0.46	0.003	17
H	X_1	1.99	-0.22	0.31	0.019	17
	X_2	1.99	-0.27	0.39	0.008	17
$D = 0.79 - 0.05X_1 - 0.07X_2$		$R^2 = 0.66$		$p < 0.001$	$n = 17$	
$H = 2.02 - 0.22X_1 - 0.26X_2$		$R^2 = 0.63$		$p < 0.001$	$n = 17$	

沙质草地植物群落的 CCA 排序的 AX_1 、 AX_2 分别与 Simpson 指数(D)、Shannon-Wiener 指数(H)线性回归的测定系数都很低且不显著,说明沙质草地生态优势度与土壤养分梯度之间,以及物种多样性与土壤养分梯度之间不呈线性相关;同样地,群落的生态优势度和物种多样性分别与水盐及酸碱梯度也不呈线性变化规律.

但是,由表6可见,沙质草地植物群落的生态优势度、物种多样性指数分别与土壤养分梯度和水盐及酸碱梯度二元指标之间有显著的二元线性关系, R^2 分别为0.66和0.63,表明科尔沁沙质草地群落多样性是有土壤养分和水盐及酸碱度等众多因子共同决定的.其中,在Simpson生态优势度指数模型中,土壤养分的贡献率为41.67%,水盐及酸碱度的贡献率为58.33%;Shannon-Wiener多样性指数模型中,土壤养分的贡献率为45.83%,水盐及酸碱度的贡献率为54.17%.

3.5 沙质草地群落生产力与土壤因子梯度的关系

群落生物量与环境因子相关性(表4),表明生物量与土壤有机碳、全氮、有效氮、有效钾、土壤水分、pH和电导率呈显著的正相关关系($p < 0.01$).建立群落生物量 W 与这些因子的多元回归模型为:

$$W = 259.62 - 35.71C + 459.76N - 3.08AN + 2.33AK + 17.70SM - 59.04pH + 2.98EC$$

$$(R^2 = 0.94, p < 0.001)$$

该模型中,土壤养分(C、N、AN、AK)对生物量的贡献率为 86.73%,土壤水分、盐及酸碱性(SM、EC、pH)对生物量的贡献率为 13.27%。说明土壤养分在数学模型中对生物量作用最大。

4 讨论

物种多样性不仅能够度量群落的组成结构和功能的复杂性,而且也能指示环境状况。群落生产力是衡量群落生态功能最重要的指标,其变化能够反映群落结构及其功能的变化。在科尔沁沙地沙漠化发展过程中,沙质草地生境的改变对某一阶段群落的形成和物种侵入具有重要影响,一定条件下的物种多样性和群落生产力与该条件下的环境容量和沙漠化的发展程度密切相关^[19]。科尔沁沙地由于土地沙漠化的发生发展,导致了沙质草地生境的空间分异和环境资源的异质性,其中作为影响沙质草地群落最重要的土壤养分和土壤水盐资源,因其资源比率的大小和空间异质性的影响,严重地制约着物种竞争的激烈程度,进而影响群落生产力和物种多样性的变化。因此,考虑资源供给水平和减轻人为过度干扰,对于保护沙地生物多样性和提高生态系统的生态功能具有指导意义。

从更广泛的意义上讲,植物群落的分布格局是不同尺度上各种环境因子,如气候、土壤、地形等综合作用的结果。区域尺度上讲,气候、植物区系决定特定的植被类型;景观尺度上讲,如海拔这一环境因子,使植被沿局部气候条件的变化而导致植被类型的变化,进而决定植被分布格局;而微生境、土壤养分等决定最终的植物群落类型^[21,22]。本研究区域范围内的海拔变化不大,样地的气候条件相对均一,植物群落分布格局更多的受土壤参数的影响。通过 CCA 研究表明,影响植物群落分布格局的主要土壤因子为土壤养分梯度,这一点与以往研究结果相一致^[13]。在本研究范围内,土壤养分从高到低,也是草地沙漠化过程中,土壤碳、氮衰减的梯度。作为对土壤养分异质性分布的反应,植物在养分丰富的局部环境中能选择性地改变其根系的生长,从而增加养分的吸收,土壤中养分含量的高低直接影响着群落的生产力^[10,23]。本研究结果也表明,土壤养分含量的高低直接影响沙质草地群落的生产力,土壤养分越丰富,群落生产力越高。

有关土壤有机质与物种多样性的关系,存在不同看法。多数人认为,植物群落高的物种多样性出现在土壤养分梯度的中间位置^[24,25],如新疆阜康荒漠带植物群落物种多样性与土壤有机质关系的研究表明,当土壤有机质处在梯度的中间水平,约 $2.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时群落物种多样性最高。而白云飞等^[1]对锡林河流域草原植物群落的研究表明,物种丰富度和多样性指数与土壤有机质及全氮含量呈正相关。本研究的结果表明,科尔沁沙地群落物种多样性与土壤有机质及全氮含量无正相关关系,而是土壤有机质处在土壤养分梯度的中间水平,约 $3.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时物种多样性最高,与前一种看法一致。草地沙漠化过程是植被退化和土壤退化过程的统一^[18]。从湿草甸到流动沙丘,随着草地沙漠化程度的加剧,土壤基质的稳定性减弱,细土物质成分下降,有机质含量、盐分和土壤肥力有效性随之降低,但随着植被退化程度的提高,水分消耗在一定程度上减弱,土壤含水量有所增加。由此表明,群落环境的土壤养分、土壤水盐状况和酸碱度的这些复杂变化及其相互关系共同决定着科尔沁沙质草地群落物种多样性的变化。

5 结论

(1)在草地退化过程中,沙质草地群落物种多样性的变化表现出由湿生化和土壤贫瘠化生境向中生、中旱生生境逐渐递增的趋势。湿草甸类型具有较高的生产力和较低的物种多样性倾向;严重沙漠化类型的流动具有低的生产力和低的物种多样性倾向,而轻度和中度沙漠化类型的固定沙丘、半固定沙丘具有中等生产力水平和最高的物种多样性。沙质草地群落生产力依次下降,下降幅度达到 90.29%。

(2)随着草地的退化,沙地表层土壤的容重波动增加,地表紧实度逐渐下降;0.05 ~ 0.10 mm 的极细沙和 0.02 ~ 0.05 mm 的粉粒含量逐渐递减,粘粒(<0.002 mm)含量波动中递减,细沙(0.10 ~ 0.25 mm)和中沙(0.25 ~ 0.50 mm)含量波动增加;土壤有机碳和全氮含量、电导率逐渐递减,全磷、有效氮、有效磷和有效钾含量波动中递减。草地沙漠化过程实质上是植被退化和土壤粗粒化及贫瘠化的过程。

(3)在草地退化过程中,土壤养分、水盐和酸碱度相互关系及相互作用,共同影响着植物群落的分布格局,其中土壤养分梯度是沙质草地群落分布格局的主要土壤限制因子。通过回归模型分析表明,沙质草地群落物种多样性、生产力变化受土壤养分、水盐及酸碱度因子共同影响。但土壤养分对群落生产

力的影响明显大于土壤水盐及酸碱度作用,二者对生物量的贡献率分别为 86.73%和 13.27%.

参考文献:

[1] 白永飞,李凌浩,王其兵. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究[J]. 植物生态学报,2000,24(6):667 ~ 673.

[2] Jonathan L, Nicole M G. Patterns of plant diversity and plant-environmental relationships across three riparian corridors [J]. Forest Ecology and Management, 2005,204: 267 ~ 278.

[3] Ansgar Kahmen, Jörg Perner, Volker Audorff, *et al.* Effects of plant diversity, community composition and environmental parameters on productivity in montane European grasslands [J]. Oecologia, 2005, 142: 606 ~ 615.

[4] André P, Schaffers. Soil, biomass, and management of semi-natural vegetation Part II . Factors controlling species diversity [J]. Plant Ecology, 2002, 158: 247 ~ 268.

[5] Wilson J B, Lee W G, Mark A F. Species diversity in relation to ultramafic substrate and to altitude in southwestern New Zealand [J]. Vegetatio, 1990, 86: 15 ~ 20.

[6] 王淑平,周广胜,吕育财,等. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报,2002,26(5):513 ~ 517.

[7] Huston M A. Hidden treatments in ecological experiments: reevaluating the ecosystem function of biodiversity [J]. Oecologia, 1997, 110: 449 ~ 460.

[8] 安树青,王峥嵘,朱学雷,等. 土壤因子对次生森林群落物种多样性的影响[J]. 武汉植物学研究,1997, 15(2):143 ~ 150.

[9] Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, *et al.* Plant diversity and productivity experiments in European grasslands [J]. Science, 1999, 286: 1123 ~ 1127.

[10] 王长庭,龙瑞军,王启基,等. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J]. 草业学报,2005,14(4):15 ~ 20.

[11] Thalen D C P. Variation in some saltmarsh and dune vegetation in the Netherlands with special reference to gradient situations [J]. Acta Bot Neerl, 1971, 20: 321 ~ 342.

[12] Zhang T H, Zhao H L, Li S G, *et al.* A comparison of different measures for stabilizing moving sand dunes in the Horqin Sandy Land of Inner Mongolia, China [J]. Journal of Arid environments, 2004, 58:203 ~ 214.

[13] 文海燕,赵哈林. 退化沙质草地植被与土壤分布特征及相关分析[J]. 干旱区研究,2004,21(1):76 ~ 80.

[14] 李玉强,赵哈林,移小勇,等. 沙漠化过程中科尔沁沙地植物-土壤系统碳氮储量动态[J]. 环境科学,2006, 27(4):635 ~ 640.

[15] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成和多样性变化特征[J]. 水土保持学报,2006, 20(1):181 ~ 185.

[16] 左小安,赵学勇,张铜会,等. 科尔沁沙地榆树疏林草地物种多样性及乔木种群空间格局[J]. 干旱区资源与环境,2005, 19(4):63 ~ 68.

[17] 苏永中,赵哈林. 持续放牧和围封对科尔沁退化沙地草地碳截存的影响[J]. 环境科学,2003,24(4):23 ~ 28.

[18] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京:海洋出版社, 2003. 74 ~ 83.

[19] Zhang J Y, Zhao H L, Zhang T H, *et al.* Community succession along a chronosequence of vegetation restoration on sand dunes in Horqin Sandy Land [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62: 555 ~ 566.

[20] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996.

[21] 张峰,张金屯,张峰. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 421 ~ 427.

[22] Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountains, Namibia [J]. Journal of Vegetation Science, 2001, 12: 53 ~ 60.

[23] Gross K L, Pregitzer K S, Burton A J. Spatial variation in nitrogen availability in three successional plant communities [J]. Journal of Ecology, 1995, 83:357 ~ 367.

[24] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients [J]. Ann Missouri BotGard, 1988, 75:1 ~ 34.

[25] 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[J]. 应用生态学报,2002,13(6):658 ~ 662.