



巴丹吉林沙漠南缘植被物种多样性 及其与土壤特性的关系

王 蒙¹, 董治宝¹, 罗万银¹, 逯军峰¹, 李继彦¹, 崔徐甲², 张 玉²

(1 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 2 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062)

摘 要:通过对巴丹吉林沙漠南缘地区植被的野外调查,探讨了植被物种组成与物种多样性对样地沿距沙漠中心的距离变化的响应,以及物种多样性与土壤因子间的关系。结果表明:(1)研究区主要物种共计 10 科 18 属 20 种,植物种类以沙漠旱生植物为主,样地的植被群落类型都是灌木与草本植物群落。(2)随着样地向沙漠外缘的延伸,植物种类和数量逐渐增多,群落结构更加复杂化和多样化;样地 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数呈上升趋势,优势度指数逐渐下降;灌木层与样地的 α 多样性指数变化趋势一致,草本层变化幅度较小; β 多样性指数中 Bray-Curtis 指数呈下降趋势,说明植物群落之间的物种替换速率降低。(3)物种多样性指数与土壤因子的相关关系及逐步回归分析表明土壤有机质和土壤全氮含量对植被的影响显著,土壤表层 20~40 cm 中的土壤速效磷与样地物种多样性和草本层物种多样性之间具有显著相关关系。

关键词:巴丹吉林沙漠;植被特征;物种多样性;土壤特性

中图分类号: Q948.1; Q948.15⁺6

文献标志码: A

Species Diversity of Vegetation and Its Relationship with Soil Characteristics in the Southern Marginal Zone of the Badain Jaran Desert

WANG Meng¹, DONG Zhibao¹, LUO Wanyin¹, LU Junfeng¹, LI Jiyan¹, CUI Xujia², ZHANG Yu²

(1 Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2 College of Tourism & Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Vegetation species composition and species diversity in response to the distance from the plots and the center of desert were explored through the vegetation field survey in the southern edge of the Badain Jaran Desert. The results showed: (1) 10 families, 18 genera and 20 species were recorded in the study area. The plant type was mainly xerophyte. The type of vegetation community were shrubs and herbaceous communities. (2) With the plot extends to the outer edge of the desert, the type and number of plants increased gradually. Community structure was more complex and diversified. Shannon-Wiener index and Simpson index of plots increased while the dominance index decreased gradually. The index trend of shrub layer was consistent with the plots in α -diversity indices. However, the index change of herb layer was slight. The Bray-Curtis index of β -diversity showed a downward trend which indicated that the species substitution rate between plant community was gradually reduced. (3) Relationships between species diversity of plant and soil factors and the stepwise regression analysis indicated that the effects of soil organic matter and nitrogen content on the vegetation was significant, and there was a significant correlation between soil phosphorus in 20–40 cm and species diversity of plots and herb layer.

收稿日期: 2014-05-19; 修改稿收到日期: 2014-11-01

基金项目: “十二五”科技支撑计划农村领域科技基础性工作专项(2012BAD16B0303); 国家林业公益性行业科研专项经费(201304325)

作者简介: 王 蒙(1988—), 女, 在读博士研究生, 主要从事沙产业研究。E-mail: lzwm88@126.com

Key words: Badain Jaran Desert; vegetation characteristics; species diversity; soil characteristics

巴丹吉林沙漠位于阿拉善荒漠中心,是中国第二大沙漠^[1],以其独特的高大沙山-湖泊景观著称,引起了国内外学者的广泛关注和研究兴趣^[2]。长期以来,有关该区的植被研究主要是 20 世纪 60 年代初期中国科学院内蒙古-宁夏综合考察队对内蒙古及其毗邻地区的植被与草场的综合考察^[3],从植被群落结构和物种多样性角度的研究有阿拉善荒漠一年生植物层片物种多样性^[4-5]、植物多样性与土壤理化性质的关系^[6]、雅布赖风沙区物种多样性^[7]、阿拉善左旗植物物种多样性的分布特征^[8]等,但目前针对巴丹吉林沙漠周边地区的植物多样性研究较少。

植被物种组成与物种多样性随环境梯度的变化格局反映了群落环境的变化以及植物群落与环境变化的关系。植物分布与环境因子相互影响和制约,所有的环境因子中,土壤对植物的生长和分布起着非常重要的作用^[9],尤其是在干旱区域,土壤含水量决定了植物的斑块分布,进而促进了灌木丛下“肥岛”的形成^[10],土壤的空间异质性增加,又进一步影响了植物分布^[11]。因此,了解植物与土壤因子之间的关系对旱区的管理和恢复非常重要。因此,本研究以巴丹吉林沙漠南缘阿拉善右旗和雅布赖附近的典型植被区为野外考察对象,探讨植被物种组成和物种多样性沿沙漠中心距离的变化特征,以及物种多样性与样地土壤因子之间的关系,旨在为该区退化生态系统的恢复和重建提供科学依据。

1 研究区概况

研究区 A 和 B 位于巴丹吉林沙漠南缘(图 1),分别与阿拉善右旗和雅布赖相邻,地形呈现南高北低特征,平均海拔分别为 1 304 m 和 1 560 m 左右。该地区属温带荒漠干旱区,为典型干燥大陆性气候,常年日照充足,降水稀少,蒸发强烈,具体气候参数详见表 1。该地区主要的植被有白刺(*Nitraria tangutorum*)、霸王(*Sarcosygium xanthoxylum*)、沙蒿(*Artemisia desteriorum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)等旱生和超旱生

的灌木、半灌木,以及沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、碟果虫实(*Corispermum patelliforme*)等沙丘先锋物种。

2 研究方法

2.1 样地调查

由于巴丹吉林沙漠南缘地区路途艰险,本次调查分别从阿拉善右旗和雅布赖向巴丹吉林沙漠行驶,选取植被典型区域 A 和 B,植被调查从沙漠内缘开始进行,沿着沙漠中心向外的方向依次设置样方,灌木样方采用 10 m×10 m 或 5 m×5 m,并在灌木样方的四角和中心设置 1 m×1 m 样方,用于草本调查。此次调查共设置灌木样方 22 个,草本样方 171 个。其中,研究区 A 中设置 10 个 10 m×10 m 和 9 个 5 m×5 m 的灌木样方,86 个 1 m×1 m 草本样方;研究区 B 中设置 13 个 5 m×5 m 灌木样方、85 个 1 m×1 m 草本样方(表 2)。灌木调查内容包括:物种、株数、高度、长短轴、盖度、生长及分布状况。草本调查内容包括:物种、株数、高度、盖度等。调查过程中注意记录样地状况。同时,在各灌木样方内用土钻钻取 3 个 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土样,用于土壤有机质含量等土壤理化参数的测定。另外,在调查的同时使用 GPS 对调查地点定位,并记录各样地的海拔高度、地貌等环境因子。

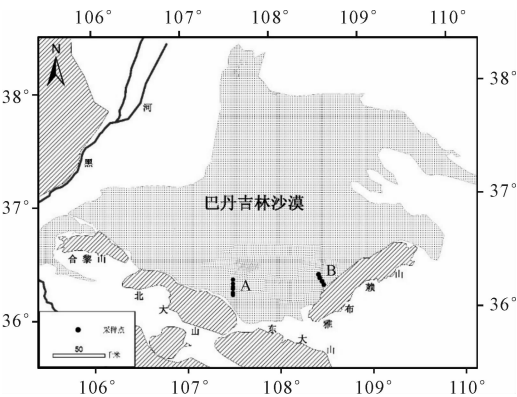


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 The geographic position of study areas

表 1 研究区 A 和 B 的气候状况

Table 1 Climatic condition of study areas

研究区 Study area	年均气温 Average annual temperature/℃	年均降水量 Average annual precipitation/mm	年均蒸发量 Average annual evaporation/mm	年均日照时数 Average annual hours of sunshine/h	年均风速 Average annual wind speed/(m·s ⁻¹)	无霜期 Frost-free period/d
A ^[12]	8.4	72.4	3 900	3 104	4.4	155
B	9.6 ^[7]	84 ^[7]	3 226 ^[7]	3 000—3 400 ^[13]	≈4 ^[14]	211 ^[7]

表 2 研究区样地基本情况
Table 2 The basic case of the plot sites in the study areas

研究区 Study area	样地号 Plot No.	地理位置 Geographic position		海拔 Elevation /m	取样情况 Sampling case/(m×m)			土壤因子(0~20 cm 和 20~40 cm 的平均值) Soil factor(mean of 0-20 cm and 20-40 cm)		
		纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E		灌木 Shrub 5×5	10×10	草本 Herb 1×1	pH	电导率 EC/(μs/cm)	土壤含水量 SW/%
A	A1	39°39′12.96″	101°28′39.69″	1 263	0	2	10	8.99	4.25	0.33
	A2	39°38′08.96″	101°29′09.93″	1 265	0	4	20	9.70	3.65	0.44
	A3	39°37′02.78″	101°29′22.62″	1 293	0	4	20	9.74	4.50	0.33
	A4	39°36′24.65″	101°29′37.18″	1 310	3	0	12	9.81	6.22	0.41
	A5	39°35′55.90″	101°29′45.06″	1 323	3	0	12	9.84	4.04	0.34
	A6	39°34′52.37″	101°28′44.91″	1 371	3	0	12	9.80	6.15	0.49
B	B1	39°43′51.34″	102°47′19.47″	1 551	4	0	25	9.10	0.92	0.37
	B2	39°43′40.76″	102°47′29.03″	1 554	3	0	20	8.80	3.41	0.28
	B3	39°43′34.32″	102°47′37.13″	1 563	3	0	20	9.39	2.63	0.28
	B4	39°43′11.25″	102°48′01.88″	1 572	3	0	20	9.00	22.00	0.52

2.2 物种多样性测度

2.2.1 α 多样性 本文采用重要值作为物种多样性计算的依据^[15]。

重要值(IV)计算公式为: $IV=(Hr+Cr+Fr)/3$ 式中, Hr 为相对高度; Cr 为相对盖度; Fr 为相对频度。

物种多样性测度选用丰富度指数、多样性指数、均匀度指数和优势度指数 4 类, 计算公式如下^[16]:

(1) 丰富度指数(R): $R=S$

(2) 多样性指数: Shannon-Wiener 指数(H'):

$$H'=-\sum_{i=1}^SP_i\ln P_i$$

Simpson 指数(D): $D=1-\sum_{i=1}^SP_i^2$

(3) 均匀度指数: Pielou 指数(J_{sw}):

$$J_{sw}=H'/\ln S$$

(4) 优势度指数: Simpson 优势度指数(C):

$$C=\sum_{i=1}^SP_i^2$$

式中, P_i 为样方中第 i 种物种的相对重要值, S 为样地中的物种数。

2.2.2 β 多样性 (1) Sorenson 群落相似性指数^[17]: $C_j=j/(a+b)$

式中, j 为两个群落共有种数; a 和 b 分别为群落 A 和 B 的物种数。

(2) Bray-Curtis 指数^[18]: $C_n=2j_N/(a_N+b_N)$

式中, a_N 为样地 A 的物种数目, b_N 为样地 B 的物种数目, j_N 为样地 A(j_{Na}) 和 B(j_{Nb}) 共有种中个体数目较小者之和, 即 $j_N=\sum\min(j_{Na}+j_{Nb})$, 本文使用重要值代替个体数目。

2.3 土壤理化参数测定

每个样地的土壤数据是 3 个重复样品的平均

值。土壤有机质(OM)含量的测定采用重铬酸钾法;全氮含量(TN)用凯氏定氮法测定,有效氮含量(AN)用扩散吸收法测定,全磷含量(TP)用钼蓝比色法测定,速效磷含量(AP)用钼锑抗比色法测定,全钾含量(TK)采用氢氟酸-高氯酸消煮,火焰光度计法测定,速效钾含量(AK)采用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定,土壤含水量(SW)的测定采用烘干法,土壤 pH 值使用电位法测定,电导率(EC)使用电导率计测定。

2.4 数据分析

使用 SPSS 19.0 软件进行数据分析,以土壤的 10 个理化性质指标为自变量,以乔、灌、草分层的物种多样性指数为因变量,对两者之间进行逐步多元回归分析;研究区 A 和 B 物种多样性指数之间的比较采用 t 检验。

3 结果与分析

3.1 研究区植被组成特征

研究区主要物种共计 10 科 18 属 20 种(表 3 和表 4),植被种类主要是沙漠旱生物种。通过计算各样地植被重要值后发现,研究区 A 和 B 中样地的植被群落类型都是灌木与草本植物群落。研究区 A 中,样地 A1、A2、A3 中主要的灌木是白刺,其主要草本植物是一年生草本植物沙米和碟果虫实,其中 A2 中偶有灌木阿拉善沙拐枣, A3 中偶有灌木霸王;样地 A4、A5、A6 中植被种类逐渐增多,灌木种增加了矮小灌木锦鸡儿和紫菀木,一年生草本植物的优势程度减低,逐步被多年生草本植物代替,如沙葱和戈壁针茅等,但是总体上仍然以灌木、矮小灌木为优势。研究区 B 中样地 B1 的优势种是半灌木沙

蒿,草本植物是以沙米为主,伴有阿魏、碟果虫实和雾冰藜;样地 B2、B3、B4 的灌木优势种都是霸王,主要的草本植物分别是多年生草本植物沙竹、戈壁针茅、沙葱。总之,随着样地向沙漠外缘的延伸,研究区 A 与 B 的样地优势种数目都呈逐渐递增的趋势。

3.2 研究区植物生长型特征变化

植物生长型是表征群落外貌特征和垂直结构的重要指标^[19],本研究中植物的生长型主要分为 3 个类型:灌木、一年生草本和多年生草本。图 2 是研究区 A 和 B 的样地植物生长型特征。从图 2 中可以看出,随着样地由沙漠内缘向外缘的延伸,样地物种数量逐渐增多,其中灌木与样地物种数量变化呈一致的递增趋势。灌木层片作为荒漠区的稳定层

片^[7],反映出了其变化趋势对整个植物群落的重要影响。一年生草本植物在沙漠内缘占优势,多年生草本在沙漠外缘数量增加,这种变化反映出了植物对不同生境长期适应的结果。

3.3 研究区物种多样性特征变化

3.3.1 α 多样性 研究区 A 和 B 中各样地植物物种多样性指数以及各样地中灌木和草本的多样性指数(图 3)的计算结果表明:(1)Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数变化趋势基本一致,都能很好地反映出植物物种多样性在各样地中的变化趋势,而 Simpson 优势度指数与 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数则呈相反的变化趋势;(2)不同群落结构的物种多样性指数差异显著,其中,灌木层片同样

表 3 研究区 A 样地植被重要值及其排序
Table 3 The vegetation IV(important value) in A study area

植物名称 Plant name	属 Genus	科 Family	A1	A2	A3	A4	A5	A6
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	白刺属 <i>Nitraria</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	0.78(1)	0.69(1)	0.69(1)	0.56(1)	0.57(1)	0.34(4)
沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	沙蓬属 <i>Agriophyllum</i>	藜科 Chenopodiaceae	0.46(2)	0.50(2)	0.38(3)	—	0.12(6)	—
碟果虫实 <i>Corispermum patelliforme</i>	虫实属 <i>Corispermum</i>	藜科 Chenopodiaceae	0.43(3)	0.38(3)	0.47(2)	0.43(3)	0.44(2)	0.12(9)
阿拉善沙拐枣 <i>Calligonum alaschanicum</i>	沙拐枣属 <i>Calligonum</i>	蓼科 Polygonaceae	—	0.26(4)	—	—	0.14(4)	0.17(8)
霸王 <i>Sarcozygium xanthoxylum</i>	霸王属 <i>Sarcozygium</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	—	—	0.28(4)	0.36(5)	0.37(3)	0.28(6)
锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	豆科 Fabaceae	—	—	—	0.45(2)	0.14(5)	0.41(2)
沙葱 <i>Allium mongolicum</i>	葱属 <i>Allium</i>	百合科 Liliaceae	—	—	—	0.38(4)	—	—
铺地棘豆 <i>Oxytropis humifusa</i>	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	豆科 Fabaceae	—	—	—	0.35(6)	—	—
猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	豆科 Fabaceae	—	—	—	—	0.21(4)	—
紫菀木 <i>Asterothamnus alyssoideus</i>	紫菀木属 <i>Asterothamnus</i>	菊科 Asteraceae	—	—	—	—	—	0.49(1)
戈壁针茅 <i>Stipa gobica</i>	针茅属 <i>Stipa</i>	禾本科 Poaceae	—	—	—	—	—	0.40(3)
驼绒藜 <i>Ceratoides latens</i>	驼绒藜属 <i>Ceratoides</i>	藜科 Chenopodiaceae	—	—	—	—	—	0.30(5)
绵刺 <i>Potaninia mongolica</i>	绵刺属 <i>Potaninia</i>	蔷薇科 Rosaceae	—	—	—	—	—	0.25(7)

注:—表示该样地中没有该种植物;括号中的数字是重要值从大到小的排序;下同。
Notes:— indicates that there is no plant in the plot;the number in brackets is the sort of important value;The same as below.

表 4 研究区 B 样地植被重要值及其排序
Table 4 The vegetation IV in B study area

植物名称 Plant name	属 Genus	科 Family	B1	B2	B3	B4
沙蒿 <i>Artemisia desteriorum</i>	蒿属 <i>Artemisia</i>	菊科 Asteraceae	0.67(1)	0.33(4)	0.27(3)	0.41(2)
沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	沙蓬属 <i>Agriophyllum</i>	藜科 Chenopodiaceae	0.48(2)	0.36(3)	0.23(6)	0.13(10)
阿魏 <i>Ferula bungeana</i>	阿魏属 <i>Ferula</i>	伞形科 Apiaceae	0.43(3)	—	—	—
碟果虫实 <i>Corispermum patelliforme</i>	虫实属 <i>Corispermum</i>	藜科 Chenopodiaceae	0.27(4)	—	—	0.23(6)
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>	雾冰藜属 <i>Bassia</i>	藜科 Chenopodiaceae	0.15(5)	—	—	—
霸王 <i>Sarcozygium xanthoxylum</i>	霸王属 <i>Sarcozygium</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	—	0.50(2)	0.53(1)	0.56(1)
沙竹 <i>Psammochloa mongolica</i>	沙鞭属 <i>Psammochloa</i>	禾本科 Poaceae	—	0.52(1)	0.19(8)	—
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	蒿属 <i>Artemisia</i>	菊科 Asteraceae	—	0.24(5)	0.26(4)	0.14(9)
铺地棘豆 <i>Oxytropis humifusa</i>	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	豆科 Fabaceae	—	0.11(6)	—	0.22(7)
戈壁针茅 <i>Stipa gobica</i>	针茅属 <i>Stipa</i>	禾本科 Poaceae	—	0.10(7)	0.29(2)	0.16(8)
蒙古扁桃 <i>Amygdalus mongolica</i>	桃属 <i>Amygdalus</i>	蔷薇科 Rosaceae	—	—	0.24(5)	0.27(4)
锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	豆科 Fabaceae	—	—	0.21(7)	0.26(5)
沙葱 <i>Allium mongolicum</i>	葱属 <i>Allium</i>	百合科 Liliaceae	—	—	—	0.36(3)
西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	蓼属 <i>Polygonum</i>	蓼科 Polygonaceae	—	—	—	0.11(11)

地的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数变化趋势一致,表现为随着样地向沙漠外缘的延伸而递增;草本层片的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在研究区 A 中是先递增后减少,在研究区 B 中变化幅度小,趋势不定;(3)随着样地向沙漠外缘的延伸,样地的 Simpson 优势度指数呈递减趋势,并以灌木层片变化最为显著。(4)均匀度指数反映物种多度分布的均匀程度。在研究区 A 和 B 中,物种数量总体较少,各层片结构数量差异不大,因此表现在均匀度指数上,均呈现普遍较高的趋势。

另外, t 检验结果(表 5)显示,研究区 A 与研究区 B 的样地、灌木层物种多样性指数差异均不显著,而草本层的差异大多达到显著水平;研究区 B 的草本层丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Simpson 优势度指数显著高于研究区 A。

3.3.2 β 多样性 β 多样性是指沿着环境梯度的变化物种替代的程度^[20],与 α 多样性一起构成群落或生态系统总体多样性或一定地段的生物异质性^[21]。本试验采用 Sorenson 指数和 Bray-Curtis 指数反映研究区 A 和 B 中植物物种随着样地向外延伸的变化规律(图 4)。结果显示,研究区 A 和 B 的 Sorenson 指数变化趋势不一致,而 Bray-Curtis 指数变化趋势基本一致。研究区 A 中,Sorenson 指数先增加后减少、又增加,变化不稳定,Bray-Curtis 指数则表现出下降趋势,在样地 A1 和 A2、样地 A2 和 A3 之

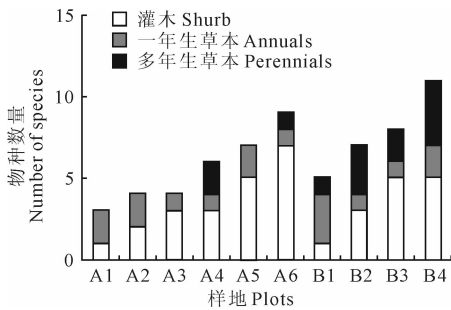


图2 研究区 A 和 B 各样地植被生长型特征
Fig. 2 The growth form characteristics of plots in A and B study areas

间较高,下降幅度小,随着样地向沙漠外缘延伸,Bray-Curtis 指数下降趋势显著;研究区 B 中,两个指数变化趋势同研究区 A 表现相似,Sorenson 指数先增加后减少,而 Bray-Curtis 指数在样地 B1 和 B2 之间较高,样地 B2 和 B3 之间 Bray-Curtis 指数明显下降,这说明沙漠内缘样地群落之间的物种替换速率较高,随着样地向沙漠外缘延伸,植物群落之间的物种替换速率降低,并且呈现出一致的下降趋势。

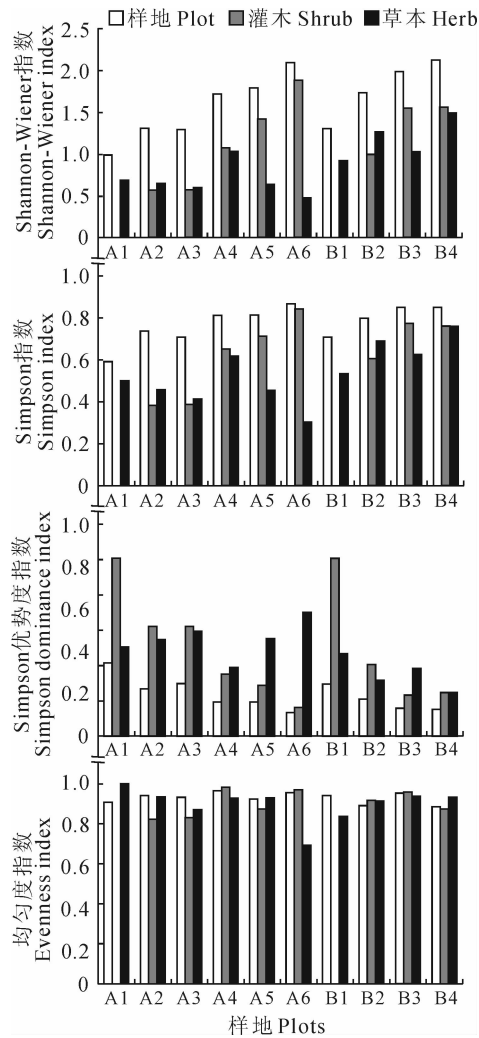


图3 研究区 A 和 B 各样地 α 多样性特征
Fig. 3 α -diversity of plots in A and B study areas

表 5 研究区 A 与 B 的 α 多样性指数的 t 检验
Table 5 t -test of α -diversity indices in A and B study areas

项目 Item	丰富度指数 Richness index	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 指数 Simpson index	优势度指数 Dominance index	均匀度指数 Evenness index
样地 Plot	0.253	0.346	0.434	0.434	0.310
灌木层 Shrub layer	0.780	0.816	0.863	0.863	0.687
草本层 Herb layer	0.006 * *	0.007 * *	0.017 *	0.017 *	0.869

注:表中值为 t 值;* 和 * * 分别表示研究区 A 和 B 之间在 0.05 和 0.01 水平存在显著性差异。
Note: Values in the table are t value;* and * * indicate significant difference between area A and area B at the 0.05 and 0.01 level, respectively.

3.4 研究区土壤因子变化特征

表 6 和表 7 分别列出了研究区 A 和 B 剖面 0~20 cm 及 20~40 cm 的土壤因子数据特征值,从表 6

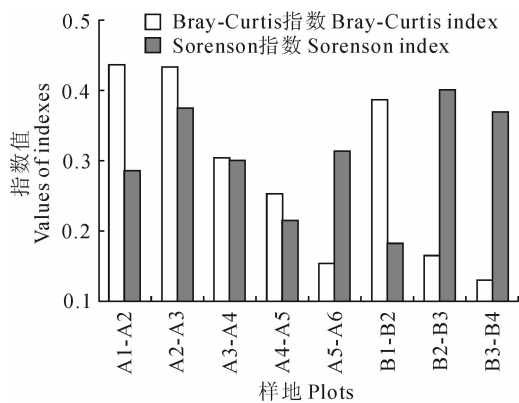


图 4 研究区 A 和 B 的 β 多样性特征
Fig. 4 β -diversity of plots in A and B study areas

中可以看出,研究区 A 剖面 0~20 cm 的土壤养分含量较低,并且最大值、最小值、平均值和极差均有较大差别,其中有效氮含量的变异系数最大,表明土壤有效氮含量在研究区 A 中空间变异最大,pH 的变异系数最小。研究区 B 剖面 0~20 cm 的土壤有机质含量较研究区 A 高,但最大值只有 0.769%,说明该区土壤比较贫瘠,其他土壤养分含量也存在明显差异,其中空间变异最大的是有机质含量,速效钾含量的变异系数最小。

对比 0~20 cm 土壤因子的特征,20~40 cm 的土壤因子在不同地点依然存在较大差别,研究区 A 中,pH 的变异系数依然最小,而其他土壤因子的空间变异均较大。研究区 B 剖面 20~40 cm 与 0~20 cm 的土壤因子变异情况相似,速效钾含量的空间变异最小。总体上看,土壤因子中,pH 的变异系数差

表 6 研究区 A 和 B 的土壤因子(0~20 cm)统计特征值
Table 6 Statistic eigenvalues of soil factors(0—20 cm) in A and B study areas

	研究区 Study area	OM /%	TN /(g/kg)	TP /(g/kg)	TK /(g/kg)	AN /(mg/kg)	AP /(mg/kg)	AK /(mg/kg)	pH	EC /(μ s/cm)	SW /%
A	最大值 Max	0.266	0.200	0.435	14.196	170.802	3.421	399.944	9.900	7.300	0.543
	最小值 Min	0.138	0.039	0.129	7.836	6.698	1.360	269.946	8.260	3.380	0.040
	平均值 Average	0.183	0.144	0.320	12.409	49.673	2.436	336.615	9.537	4.523	0.300
	极差 R	0.128	0.161	0.306	6.360	164.104	2.061	129.998	1.640	3.920	0.503
	标准差 SD	0.047	0.070	0.105	2.339	64.190	0.901	48.852	0.631	1.395	0.175
	变异系数 C. V/%	25.760	48.532	32.844	18.852	129.225	36.971	14.513	6.618	30.849	58.487
B	最大值 Max	0.769	0.069	0.263	13.061	18.084	4.382	359.940	9.600	4.070	0.509
	最小值 Min	0.152	0.039	0.129	7.836	6.698	0.673	319.945	8.160	1.062	0.137
	平均值 Average	0.328	0.052	0.202	10.108	11.218	1.909	337.438	9.130	2.806	0.294
	极差 R	0.617	0.029	0.134	5.225	11.386	3.709	39.995	1.440	3.008	0.371
	标准差 SD	0.297	0.015	0.062	2.170	4.842	1.675	17.078	0.655	1.368	0.170
	变异系数 C. V/%	90.612	29.013	30.673	21.466	43.159	87.734	5.061	7.174	48.749	57.905

表 7 研究区 A 和 B 的土壤因子(20~40 cm)统计特征值
Table 7 Statistic eigenvalues of soil factors(20—40 cm) in A and B study areas

	研究区 Study area	OM /%	TN /(g/kg)	TP /(g/kg)	TK /(g/kg)	AN /(mg/kg)	AP /(mg/kg)	AK /(mg/kg)	pH	EC /(μ s/cm)	SW /%
A	最大值 Max	0.422	0.192	0.417	17.456	28.125	3.146	389.935	9.890	8.410	0.777
	最小值 Min	0.115	0.113	0.250	12.358	8.707	0.673	199.969	9.720	3.910	0.237
	平均值 Average	0.193	0.163	0.348	14.225	16.073	2.212	307.951	9.772	5.092	0.488
	极差 R	0.307	0.079	0.167	5.098	19.418	2.473	189.966	0.170	4.500	0.540
	标准差 SD	0.129	0.035	0.061	1.909	8.049	0.944	79.165	0.077	1.880	0.220
	变异系数 C. V/%	66.905	21.332	17.496	13.417	50.079	42.678	25.707	0.784	36.927	45.036
B	最大值 Max	0.326	0.072	0.210	13.900	154.038	1.085	349.951	9.470	40.300	0.595
	最小值 Min	0.106	0.054	0.149	9.380	6.698	0.123	329.943	8.410	0.784	0.216
	平均值 Average	0.204	0.062	0.184	10.915	47.718	0.501	334.955	9.025	11.676	0.428
	极差 R	0.220	0.018	0.061	4.520	147.340	0.962	20.008	1.060	39.516	0.379
	标准差 SD	0.091	0.008	0.030	2.044	71.108	0.425	9.997	0.499	19.107	0.168
	变异系数 C. V/%	44.657	12.177	16.240	18.725	149.017	84.876	2.985	5.531	163.640	39.410

别最小,表明该区 pH 的空间变异最低。

3.5 研究区植物物种多样性与土壤因子的关系

物种多样性指数与立地土壤因子的相关性分析表明:在剖面 0~20 cm 中(表 8),样地的物种多样性指数中只有丰富度指数与土壤的有机质含量表现出显著($P<0.05$)正相关;灌木层的物种多样性指数中,丰富度指数受土壤含水量的影响较大,具有显著正相关关系,均匀度指数与全氮含量和全钾含量

均具有显著的负相关关系;草本层的物种多样性指数与土壤因子均具有显著关系,其中,丰富度指数与有机质含量和全氮含量分别呈有显著的正相关和负相关,Shannon-Wiener 指数和优势度指数均受有机质含量的影响,具有显著正相关关系,均匀度指数受全磷含量和全钾含量的影响最大,具有显著的正相关关系。

同时,相比剖面 0~20 cm,剖面 20~40 cm 中

表 8 物种多样性与剖面(0~20 cm)土壤因子的相关系数

Table 8 The correlation coefficient between species diversity and soil factors in cross-section 0—20 cm

	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	ph	EC	SW
R	0.678 *	-0.562	-0.603	-0.333	-0.079	0.065	0.190	0.277	0.262	0.559
R _S	0.312	-0.242	-0.425	-0.249	0.193	-0.132	0.308	0.491	0.599	0.730 *
R _H	0.751 *	-0.644 *	-0.467	-0.239	-0.398	0.290	-0.088	-0.184	-0.357	-0.021
H'	0.509	-0.520	-0.482	-0.341	-0.004	-0.048	0.279	0.373	-0.329	0.496
H' _S	0.390	-0.304	-0.326	-0.193	0.135	-0.047	0.274	0.436	-0.311	0.579
H' _H	0.708 *	-0.543	-0.176	-0.056	-0.352	0.261	0.007	-0.305	0.118	-0.130
D	0.599	-0.628	-0.534	-0.343	0.027	-0.073	0.027	-0.180	-0.039	0.205
D _S	0.614	-0.403	-0.311	-0.113	0.162	0.037	0.142	0.146	-0.181	0.468
D _H	0.651 *	-0.573	-0.376	-0.192	-0.302	0.092	-0.010	-0.353	0.130	-0.011
C	-0.388	0.471	0.433	0.326	-0.027	0.105	-0.345	-0.481	0.445	-0.395
C _S	-0.366	0.246	0.187	0.087	-0.162	0.035	-0.344	-0.428	0.304	-0.478
C _H	-0.635 *	0.422	-0.008	-0.060	0.302	-0.299	0.076	0.382	-0.180	0.272
J	-0.468	-0.039	0.067	-0.256	-0.074	-0.228	0.094	0.599	-0.602	-0.120
J _S	-0.059	-0.785 *	-0.159	-0.764 *	-0.377	-0.221	-0.081	-0.094	0.104	-0.181
J _H	0.209	0.411	0.649 *	0.647 *	0.142	0.451	-0.364	-0.414	0.312	-0.428

注:R. 样地丰富度指数;R_S. 灌木层丰富度指数;R_H. 草本层丰富度指数;H'. 样地 Shannon-Wiener 指数;H'_S. 灌木层 Shannon-Wiener 指数;H'_H. 草本层 Shannon-Wiener 指数;D. 样地 Simpson 指数;D_S. 灌木层 Simpson 指数;D_H. 草本层 Simpson 指数;C. 样地优势度指数;C_S. 灌木层优势度指数;C_H. 草本层优势度指数;J. 样地均匀度指数;J_S. 灌木层均匀度指数;J_H. 草本层均匀度指数;*. 显著($P<0.05$);* *. 极显著($P<0.01$);下同。

Notes:R. Richness index of plots;R_S. Richness index of shrub layer;R_H. Richness index of herb layer;H'. Shannon-Wiener index of plots;H'_S. Shannon-Wiener index of shrub layer;H'_H. Shannon-Wiener index of herb layer;D. Simpson index of plots;D_S. Simpson index of shrub layer;D_H. Simpson index of herb layer;C. Dominance index of plots;C_S. Dominance index of shrub layer;C_H. Dominance index of herb layer;J. Evenness index of plots;J_S. Evenness index of shrub layer;J_H. Evenness index of herb layer;*. Correlation significant at the 0.05 level;* *. Correlation significant at the 0.01 level;The same as below.

表 9 物种多样性与剖面(20~40 cm)土壤因子的相关系数

Table 9 The correlation coefficient between species diversity and soil factors in cross-section 20—40 cm

	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	ph	EC	SW
R	0.523	-0.622	-0.547	-0.114	0.156	-0.818 **	0.400	-0.625	-0.064	-0.088
R _S	0.380	-0.249	-0.238	0.021	-0.012	-0.569	0.546	-0.160	0.134	0.399
R _H	0.452	-0.757 *	-0.645	-0.211	0.270	-0.736 *	0.072	-0.858 **	-0.249	0.285
H'	0.573	-0.568	-0.437	-0.047	0.179	-0.773 *	0.471	-0.390	0.076	-0.112
H' _S	0.522	-0.322	-0.202	0.091	0.116	-0.613	0.439	-0.136	0.227	-0.224
H' _H	0.600	-0.836 **	-0.610	-0.128	0.445	-0.725 *	0.073	-0.699 *	-0.074	0.148
D	0.534	-0.521	-0.411	-0.028	0.188	-0.694 *	0.542	-0.275	0.101	-0.024
D _S	0.551	-0.298	-0.153	0.160	0.200	-0.531	0.440	-0.025	0.316	-0.180
D _H	0.638	-0.800 **	-0.505	-0.087	0.444	-0.714 *	-0.037	-0.612	-0.009	0.160
C	-0.534	0.521	0.411	0.028	-0.188	0.694 *	-0.542	0.275	-0.101	0.024
C _S	-0.551	0.298	0.153	-0.160	-0.200	0.531	-0.440	0.025	-0.316	0.180
C _H	-0.638	0.800 **	0.505	0.087	-0.444	0.714 *	0.037	0.612	0.009	-0.160
J	0.078	0.122	0.174	0.212	-0.469	0.383	0.120	0.416	0.262	0.195
J _S	0.454	0.172	0.483	0.488	0.169	0.001	-0.181	0.447	0.625	-0.231
J _H	0.188	0.412	0.680 *	0.392	-0.100	0.088	-0.703 *	0.335	0.401	-0.021

表 10 物种多样性指数与土壤因子的逐步多元回归

Table 10 Stepwise multiple regression of species diversity indices and soil factors

	回归方程 Regression equation	F	P
0—20 cm	$R=4.089+9.190OM$	6.769	0.032
	$R_H=2.656+3.593OM-6.734TN$	12.471	0.005
	$H'_H=0.588+1.207OM$	8.063	0.022
	$C_H=0.356-0.944OM+0.654SW+0.064AP$	13.654	0.004
	$J_S=0.974-0.659TN$	9.633	0.021
	$J_H=0.754+0.519TP$	5.828	0.042
20—40 cm	$R=2.414-2.395AP+0.554TK$	13.352	0.006
	$R_H=4.632-14.720TN$	14.724	0.006
	$H'_H=1.062-0.349AP+0.080TK$	12.300	0.008
	$H'_H=1.444-4.399TN$	16.288	0.005
	$C=0.166+0.051AP$	6.510	0.038
	$C_H=0.251+1.600TN$	12.485	0.010
	$J_H=1.101-0.001AK$	6.857	0.034

的土壤因子与物种多样性指数的相关关系情况具有很大差异(表 9)。其中,草本层的多样性指数与全氮含量相关性较高,其中的丰富度指数是显著的负相关,Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数具有极显著($P<0.01$)负相关关系,优势度指数呈极显著正相关;样地和草本层的多样性指数(除均匀度指数外)与速效磷含量的相关关系达到显著水平;草本层的丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数与 PH 值分别达到极显著和显著的负相关关系。

进一步对物种多样性指数和土壤因子进行逐步多元回归分析,结果(表 10)表明,土层 0~20 cm 和 20~40 cm 的土壤因子对草本层的物种多样性指数影响最大,对灌木层的影响最小;土壤有机质、全氮及速效钾含量与植物多样性指数的相关性较显著,说明这 3 个土壤因子对群落多样性的影响较大。

4 讨 论

4.1 植被群落特征

巴丹吉林沙漠南缘地区的植被调查结果表明,该区域的灌木以白刺和沙蒿为主,沙漠内缘的草本植物主要是一年生固沙先锋物种沙米和碟果虫实,随着向沙漠外缘的延伸,多年生草本植物的种类和数量增多。这主要是由于沙漠内缘多为流动沙丘,沙埋情况严重,一年生植物种子萌发对适宜萌发条件具有很快的反应能力^[22],在降水较少的情况下也能迅速完成生活史^[5],与白刺、沙蒿等抗旱生灌木组成该区域的植物群落。随着向沙漠外缘的延伸,样地生境变化,沙丘流动性减弱,土壤持水能力增强,

对水分要求较高的多年生草本植物增多,多年生草本植物具有比一年生草本植物更强的抵抗环境扰动和保持种群稳定的能力^[23],群落结构逐步稳定,且更加复杂化和多样化。

4.2 物种多样性特征

物种多样性是群落的基本特征,不仅表征群落的组成结构,也是对环境状况的指示^[24]。本研究采用 α 多样性和 β 多样性相结合的方法探讨随着样地向沙漠外缘的延伸其总体多样性的特征变化。 α 多样性显示了样地的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数逐渐上升, Simpson 优势度指数呈递减趋势;根据本研究区的样地位置,可以认为在该区域物种多样性存在纬度梯度特性,这与大多研究结果一致^[25-27];物种多样性随着纬度的不断降低而增加。通过对灌木层和草本层的多样性进行分析,发现灌木层与样地变化趋势一致,表明了优势种的生态功能对群落的决定作用^[28];草本层的物种多样性指数变化幅度较小,虽然对样地物种多样性起到了一定的作用,但贡献不大。根据稳定性和多样性假说理论^[29],灌木作为该区域的优势物种,在无人干扰情况下,其稳定程度可以揭示群落的稳定程度^[30],对于维持荒漠生态系统的生物多样性、生态服务功能及稳定性等方面具有重要作用。另外, t 检验表明研究区 B 的草本层在丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Simpson 优势度指数显著高于研究区 A,可能是由于巴丹吉林沙漠东南多、西北少的降水特征所致。

Sorenson 指数在该研究区 A 和 B 中变化趋势不一致,主要是因为该指数以物种个数为测度,属于 β 多样性的二元属性数据的测度方法,它只考虑物种是否出现,而忽略了种的盖度、多度等重要信息^[31]。再应用数据测度方法——以重要值为测度的 Bray-Curtis 指数进一步分析^[32],结果表明 Bray-Curtis 指数呈现下降趋势,说明植物群落之间的物种替换速率降低,群落从沙漠内缘延伸到外缘的过程中,因沙丘的流动性减少,一年生草本植物(沙米、碟果虫实等)逐渐退出群落的组成,到多年生草本植物的出现(样地 A3 到 A4 和 B1 到 B2)使得 Bray-Curtis 指数加剧下降,之后 Bray-Curtis 指数减低缓慢主要是因为群落中的主要物种差异不明显,这些物种主要表现为生态位较广的灌木、半灌木及多年生草本植物。

4.3 物种多样性与土壤特性的关系

气候、土壤、地貌等环境因子和植被是相互影响

和制约的^[29],目前,关于两者关系的研究比较多^[33-35],但是并没有形成统一的结论,主要是因为植被分布格局不但受多种环境因子(气候、地形和土壤等)的控制^[36],而且土壤因子也受多种环境因子(如地形中的微环境、母质等)影响,且土壤因子之间又相互影响和作用^[37]。

在干旱半干旱地区,土壤氮含量是植被生长的主要限制因子之一^[38-39];Dregne^[40]指出在荒漠生态系统中,氮和磷是植被生长最常见的限制元素;但是,除此之外,土壤有机质与植被盖度、生物量以及多样性指数的关系也相当密切^[41]。本研究通过对巴丹吉林沙漠南缘植物多样性指数与立地土壤因子的相关分析及逐步多元回归分析,结果同样表明土壤有机质和土壤氮含量对植被的影响较大,并对草本植物的影响达到显著水平,其中有机质与草本植物的丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数呈显著正相关关系,主要是因为草本植物的枯枝落叶比灌木的更易降解,是土壤有机质的主要来

源^[41];另外,剖面 20~40 cm 中的土壤速效磷与该区域样地物种多样性和草本层物种多样性之间存在不同程度的相关性,其中总氮含量与草本植物的丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数呈显著负相关关系,这与 Goldberg 和 Miller^[42]的实验结果一致,即 N 含量的增加降低了物种多样性。土壤水分含量受土壤条件、地形和植被的影响^[11],该研究区域土壤含水量除了 0~20 cm 与灌木丰富度指数呈显著正相关之外,其余的相关关系并未达到显著水平,可能是因为植被生长区域比裸地上蒸发量高,土壤含水量低^[43],也有研究表明深度土壤水分对植被的影响更直接^[44]。总之,植物群落物种多样性与土壤梯度的相关关系不一致,不同区域的土壤影响因子不同,主要是局部生境异质性的结果^[45],人为干扰也是不可忽视的影响因子^[46]。因此,在恢复该区域物种多样性的同时,应该结合土壤性质特点,以恢复和重建该区生态系统。

参考文献:

- [1] ZHU J F(朱金峰),WANG N A(王乃昂),CHEN H B(陈红宝),*et al.* Study on the boundary and the area of Badain Jaran Desert based on remote sensing imagery[J]. *Progress in Geography*(地理科学进展),2010,**29**(9):1 087—1 094(in Chinese).
- [2] DONG Z B,WANG T,WANG X M. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert[J]. *Geomorphology*,2004,(60):191—203.
- [3] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 综合考察专辑:内蒙古植被[M]. 北京:科学出版社,1975.
- [4] HE M ZH(何明珠). Environmental effects on distribution and composition of desert vegetations in Alxa Plateau: V. Biodiversity and distribution of annual plants[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠),2010,**30**(3):528—533(in Chinese).
- [5] LIANG C ZH(梁存柱),LIU ZH L(刘钟龄),ZHU Z Y(朱宗元),*et al.* Specific diversity and distribution characteristics of annual synusia in Alashan desert[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报),2003,**14**(6):897—903(in Chinese).
- [6] ZHENG J G(郑敬刚),WU G X(吴国玺),HE M ZH(何明珠),*et al.* Correlation between plant diversity and soil properties in Alax Desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*(干旱区资源与环境),2009,**23**(3):151—155(in Chinese).
- [7] SI J H(司建华),FENG Q(冯 起),CHANG Z Q(常宗强),*et al.* Community structure and species diversity of desert plants in the wind-sand area of Yabulai[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2011,**31**(3):602—608(in Chinese).
- [8] MA B(马 斌),ZHOU ZH Y(周志宇),ZHANG L L(张莉丽),*et al.* The spatial distribution characteristics of plant diversity in Alex Left Banner[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报),2008,**28**(12):6 099—6 106(in Chinese).
- [9] ZUO X A,KNOPS J M H,ZHAO X Y,*et al.* Indirect drivers of plant diversity-productivity relationship in semiarid sandy grasslands[J]. *Biogeosciences*,2012,9:1 277—1 289.
- [10] SCHLESINGER W H,REYNOLDS J F,CUNNINGHAM G L,*et al.* Biological feedbacks in global desertification[J]. *Science*,1990,247:1 043—1 048.
- [11] ZUO X A,ZHAO X Y,ZHAO H L,*et al.* Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin sandy land, Northern China[J]. *Plant Soil*,2009,318:153—167.
- [12] 王 祺. 阿拉善右旗荒漠盐碱土园林植物引进栽培技术研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2006.
- [13] CHANG Z Q(常宗强),FENG Q(冯 起),*et al.* Water physiological characteristics of *Nitraria tangutorum* leaves in Yabrai sandstorm belt under different water condition[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(冰川冻土),2010,**32**(5):1 015—1 021(in Chinese).
- [14] ZHANG K C(张克存),YAO ZH Y(姚正毅),AN ZH SH(安志山),*et al.* Wind-blown sand environment and precipitation over the Badain Jaran Desert and its adjacent regions[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠),2012,**32**(6):1 507—1 511(in Chinese).
- [15] CUI X J(崔徐甲),DONG ZH B(董治宝),*et al.* Relationship between vegetation feature and physiognomy morphology with mege-dunes area in the Badain Jaran Sand Sea[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*(水土保持通报),2014,**34**(5):272—277(in Chinese).
- [16] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement[M]. New Jersey:Princeton University Press,1988:63—167.
- [17] SOUTHWOOD T R. 生态学研究方法:适用于昆虫种群的研究[M]. 罗河清,等译. 北京:科学出版社,1984.
- [18] BRAY J R,CURTIS J D. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin[J]. *Ecological Monographs*,1957,27:325—349.

- [19] MA K P(马克平), HUANG J H(黄建辉), YU SH L(于顺利), *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. Species richness, evenness and species diversities[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1995, **15**(3): 268—277(in Chinese).
- [20] LI X R(李新荣), ZHANG X SH(张新时). Biodiversity of shrub community in desert steppe and steppe desert on Erdos plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(6): 665—669(in Chinese).
- [21] LIN K M(林开敏), HUANG B L(黄宝龙). Studies on β -diversity index of undergrowth plant in Chinese fir plantation[J]. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2001, **9**(2): 157—161(in Chinese).
- [22] WANG Z L(王宗灵), XU Y Q(徐雨清), WANG G(王 刚). Germination strategies of annual sandy plants under limited precipitation [J]. *Journal of Lanzhou University* (Nat. Sci. Edi.) (兰州大学学报·自然科学版), 1998, **34**(2): 98—103(in Chinese).
- [23] ZHANG J Y(张继义), ZHAO H L(赵哈林), ZHANG T H(张铜会), *et al.* Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin sandy land[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(1): 86—92(in Chinese).
- [24] MIAO L Y(苗莉云), WANG X A(王孝安), WANG ZH G(王志高). Relationships between species diversity indices of *Larix chinensis* communities and environmental factors[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(10): 1 888—1 894(in Chinese).
- [25] SUO A N(索安宁), JU T ZH(巨天珍), *et al.* Analysis of biodiversity characteristics of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* community on Mt. Xiaolong in Gansu[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(10): 1 877—1 881(in Chinese).
- [26] HUANG J H(黄建辉), GAO X M(高贤明), MA K P(马克平), *et al.* A comparative study on species diversity in zonal forest communities[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, **17**(6): 611—618(in Chinese).
- [27] GENTRY A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environment and geographical gradients[J]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1988, **75**(1): 1—34.
- [28] HAN X G(韩兴国), HUANG J H(黄建辉), LOU ZH P(娄治平). The significance and problems associated with the keystone species concept in biodiversity conservation[J]. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 1995, **12**(生态专辑): 168—184(in Chinese).
- [29] BASKIN Y. Ecosystem function of biodiversity[J]. *Bio. Science*, 1994, **44**: 657—660.
- [30] LI CH L(李昌龙), WANG J H(王继和), SUN K(孙 坤), *et al.* Community structure and species diversity in Liangucheng Nature Reserve of Minqin County[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2006, **26**(11): 2 338—2 344(in Chinese).
- [31] ZHANG J B(张建彪), YAN M F(闫美芳), SHANGGUAN T L(上官铁梁). β -diversity of subalpine meadows in Wutai Mountain[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2006, **26**(2): 389—392(in Chinese).
- [32] MA K P(马克平), LIU C R(刘灿然), LIU Y M(刘玉明). The measurement of community diversity. II. The measurement of β diversity [J]. *Biodiversity Science* (生物多样性), 1995, **3**(1): 38—43(in Chinese).
- [33] ZUO X A, ZHAO X Y, ZHAO H L, *et al.* Scale dependent effects of environmental factors on vegetation pattern and composition in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. *Geoderma*, 2012: 173—174.
- [34] ANTOINE G, NIKLAUS E Z. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. *Ecological Modeling*, 2000, **135**: 147—186.
- [35] COOK J G, IRWIN L L. Climate-vegetation relationships between the Great Plains and Great Basin[J]. *American Midland Naturalist*, 1992, **127**: 316—326.
- [36] JAFARI M, CHAHOUKI M A, TAVILI A, *et al.* Effective environmental factors in the distribution of vegetation types in Poshtkouh rangelands of Yazd Province (Iran)[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, **56**: 627—641.
- [37] YIMER F, LEDIN S, ABDELKADIR A. Soil property variations in relation to topographic aspect and vegetation community in the south-eastern highlands of Ethiopia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **232**: 90—99.
- [38] BERG W A, BRADFORD J A, SIMS P L. Long-term soil nitrogen and vegetation change on sandhill rangeland[J]. *Journal of Range Management*, 1997, **50**: 482—486.
- [39] XIE G H, STEINBERGER Y. Temporal patterns of C and N under shrub canopy in a loessial soil desert ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 1 371—1 379.
- [40] DREGNE H E, LAL R, BLUM W H, *et al.* Desertification assessment[M]//LAL R, BLUM W H, VALENTINE C, *et al.* Method for Assessment of Soil Degradation. Boca Raton USA: CRC Press Inc., 1998: 441—458.
- [41] LI X R, JIA X H, DONG G R. Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, North-west China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **64**: 505—522.
- [42] GOLDBERG D E, MILLER T E. Effects of different resource additions on species diversity in an annual plant community[J]. *Ecology*, 1990, **71**(1): 213—225.
- [43] LI Y Y, SHAO M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **64**: 77—96.
- [44] XU M H(徐满厚), XUE X(薛 娴). Correlation among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(10): 3 158—3 168(in Chinese).
- [45] LESSCHEN J P, CAMMERAAAT L H, KOOIJMAN A M, *et al.* Development of spatial heterogeneity in vegetation and soil properties after land abandonment in a semi-arid ecosystem[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**: 2 082—2 092.
- [46] WANG L(王 琳), ZHANG J T(张金屯), SHANGGUAN T L(上官铁梁), *et al.* Species diversity of mountain meadow of Lishan and the relation with the soil physicochemical properties[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2004, **10**(1): 18—22(in Chinese).