巴丹吉林沙漠高大沙山区植被特征与地貌形态的关系

崔徐甲[1]，董治宝[1,2]，逯军峰[2]，王 蒙[2]，李继彦[2]，罗万银[2]

(1.陕西师范大学 旅游与环境学院，陕西 西安 710062；
2.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，甘肃 兰州 730000)

摘 要：通过对巴丹吉林沙漠伊和吉格德湖高大沙山区野外植被考察，研究了该地区的生物多样性，并分析了该地区植被—沙山地貌形态之间的关系。结果表明，研究区植被种类较少，以旱生物种为主，植被群落分布的垂直特征及差异明显。该区植物种共计 6 科 9 属 9 种，沿沙山上部至底部依次为：草本群落—灌木群落—草本或半灌木群落。沙多分布在背风坡，碟果虫实及白莎蒿多分布在迎风坡。总体群落多样性测度结果，沙山两坡中部多样性指数高，背风坡上部及迎风坡中部均匀度指数高。分层次群落多样性测度结果，由于草本种类单一，草本群落多样性及均匀度指数差别不大，迎风坡中部灌木群落多样性指数最高。高大沙山植被群落特征受整体沙山地貌形态影响，迎风坡植被分布及多样性变化特征与沙山第 1 和第 2 序列地貌形态有良好的对应关系。在更为广泛的沙漠发育时期，沙山表面稀疏的植被通过影响输沙率进而拦截沙粒，在维持沙山高度方面具有更为重要作用。

关键词：植被特征；高大沙山；生物多样性；地貌形态；巴丹吉林沙漠

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2014)05-0278-06 **中图分类号**：Q948.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.058

Relationship Between Vegetation Feature and Physiognomy Morphology of Mega-dunes in Badain Jaran Desert

CUI Xu-jia[1], DONG Zhi-bao[1,2], LU Jun-feng[2], WANG Meng[2], LI Ji-yan[2], LUO Wan-yin[2]

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

Abstract: Based on the field vegetation investigation of Yihejigede Lake in the Badain Jaran Desert, biodiversity was studied, and the relationship between vegetation and mega-dune morphology was analyzed. The results showed that there were less vegetation types in the study area, mainly composed by xeromorphic species, the vertical distribution and differences of vegetation communities was obvious. Vegetation in the study area belongs to 9 species, 9 genera and 6 families, from the top to the bottom of mega-dunes vegetation communities changed from herbaceous community to shrub communities to herb or subshrub community. *Agriophyllum squarrosum* distributed in the leeward slope, but *Corispermum patelliforme* and *Artemisia blepharolepis* distribuled in windward slope; The overall community diversity showed that diversity index was higher in the middle of both mega-dune slopes, and evenness index was higher in the top of leeward slope and the middle of windward slope. The hierarchical community diversity showed that diversity index and evenness index had little difference for herb community because of the relatively single species, the shrub community in the middle of windward slope had the maximum diversity index. The feature of vegetation communities was affected by the whole morphology of mega-dunes, there existed a well corresponding relation between the vegetation characteristics including distribution and diversity in the windward slope and the physiognomy morphology with order 1 and order 2 of mega-dunes. In a broader development period of desert, the sparse vegetation may play an important role in maintaining the height of mega-dunes through influencing sand transport rate and then intercepting the sand.

Keywords: vegetation feature; mega-dunes; biodiversity; physiognomy morphology; Badain Jaran Desert

收稿日期：2013-10-28 **修回日期**：2013-11-12

资助项目："十二五"科技支撑计划农村领域科技基础性工作专项"巴丹吉林沙漠植物资源利用与农牧业综合开发试验示范研究"(2012BAD16B0303)；国家林业公益性行业科研专项经费"中国沙地补充考察与沙地志编研"(201304325)

作者简介：崔徐甲(1984—)，男(汉族)，河北省石家庄市人，博士研究生，研究方向为风沙地貌。E-mail:cuixujia1984@163.com。

沙漠植被是沙漠生态系统的重要组成部分,是对全球与区域气候变化响应极为敏感的因子之一。沙漠植被影响地区输沙活动强度和风沙地貌形成,同时,荒漠化治理工程中耐旱植被选择及物种合理搭配也需要对沙漠植被深入的研究。因此,沙漠植被研究是沙漠科学的重要组成部分之一。巴丹吉林沙漠位于阿拉善荒漠中心,面积约 50 000 km^2,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,也是目前争议较大的沙漠之一[1]。目前,巴丹吉林沙漠的研究主要集中于沙漠形成的地质年代[2-4],高大沙山沉积物组成[5-6]、形态特征[7-8]、形成过程[7-11],以及湖泊的水化学特征与水源补给[11-14]等方面,关于巴丹吉林沙漠植被的研究比较少,特别是高大沙山区植被的研究更少。巴丹吉林沙漠位于东亚夏季风的边缘地区,属典型的大陆性气候,年平均降水量小于 90 mm,从东南向西北减少[7],极端干旱的气候使得巴丹吉林沙漠成为中国北方沙尘暴源地之一[15],基于此,该沙漠边缘地区生态环境保护及农牧业的合理发展显得尤为重要,巴丹吉林沙漠植被调查就成为必要的前提。同时,高大沙山—湖泊—水源补给等一系列有争议的问题,也与植被因素有着密切的关系。

本文在科技基础性工作专项"巴丹吉林沙漠植物资源利用与农牧业综合开发试验示范研究"的支持下,于 2013 年 9 月对巴丹吉林沙漠伊和吉格德湖(沙漠东南部,39°46′12.17″N,102°09′05.33″E)高大沙山区植被进行了初步调查。以期初步说明高大沙山区植被种类、分布特征、生物多样性状况以及植被—沙山地貌形态的关系,为区域资源开发利用以及相关研究提供一定的科学参考和理论指导。

1　研究方法

1.1　样方调查

植被调查方法主要采用植被样方。植被样方分别设置于伊和吉格德湖西侧高大沙山(高度约 320 m)背风坡及东侧高大沙山(高度约 330 m)迎风坡。选取两坡植被垂直分布带,沿背风坡上部、中上部、中下部和底部及迎风坡上部、中上部、中部、中下部和底部等不同地貌部位分别设置样方,同时也在伊和吉格德湖东岸低地设置了样方。其中,灌木样方采用10 m×10 m 或 5 m×5 m,并在灌木样方的四角及中心设置 1 m×1 m 样方,用于草本调查。草本样方采用 1 m×1 m。共设置灌木样方 21 个,草本样方 121 个,由于植被类型相对单一,沙山不同地貌部位样方内物种差别表现在灌木方面。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、盖度及地上部分生物量。调查过程中注意记录样地状况。

1.2　数据处理

1.2.1　重要值选取　物种重要值(I_V)在判定生物群落优势种及建群种,确定群落类型,研究生态群落结构与功能等方面具有重要意义。不同学者对于重要值的计算有不同的方法,集中在相对多度、相对密度、相对优势度、相对高度、相对盖度和相对频度等的不同组合方面[16]。沙漠地区由于风沙活动频繁,环境恶劣,植被时时受到风沙掩埋的危险。若采用相对多度及相对密度在计算重要值时存在较大误差,因此本文采用了相对高度、相对盖度及相对频度来计算重要值,此方法在相关文献中也有采用[17]。计算公式为

$$I_V=(H_r+C_r+F_r)/3 \quad (1)$$

其中:H_r——相对高度;C_r——相对盖度;F_r——相对频度。

1.2.2　多样性测度　本文选用物种丰富度指数、优势度指数、生物多样性指数及均匀度指数等[18]对巴丹吉林沙漠伊和吉格德湖高大沙山区植被群落的多样性特征进行了测度,计算公式如下:

(1) 丰富度指数:选用物种丰富度指数(S)

$$S=\text{样地的物种数} \quad (2)$$

(2) 多样性指数:选用 Shannon—Winner 指数(H')及 Simpson 指数(D)

$$H'=-\sum P_i\ln P_i \quad (i=1\cdots S) \quad (3)$$

$$D=1-\sum P_i^2 \quad (i=1\cdots S) \quad (4)$$

(3) 均匀度指数:选用 Pielou 指数(J_{SW})及 Alatato 指数(E_a)

$$J_{SW}=H'/\ln S \quad (5)$$

$$E_a=(1/\sum P_i^2-1)/(e^{-\sum P_i\ln P_i}-1) \quad (i=1\cdots S) \quad (6)$$

(4) 优势度指数:选用 Simpson 优势度指数(C)

$$C=\sum P_i^2 \quad (i=1\cdots S) \quad (7)$$

式中:P_i——样方中第 i 种物种的相对重要值;S——样地中的物种数。

2　结果与分析

2.1　植被群落特征

群落类型的确定首先是通过计算各样地物种的重要值,进而判断优势物种,然后由"优势灌木+优势草本"或"优势草本"来命名。巴丹吉林沙漠伊和吉格德湖高大沙山区各样地植物群落类型如表 1 所示。该区主要物种共计 6 科 9 属 9 种,包括:藜科—虫实属—碟果虫实、藜科—沙蓬属—沙米、蓼科—沙拐枣属—阿拉善沙拐枣、蝶形花科—岩黄芪属—花棒、菊

科—蒿属—白沙蒿、蒺藜科—骆驼蓬属—骆驼蓬、藜科—雾冰藜属—雾冰藜、藜科—盐生草属—白茎盐生草及禾本科—芦苇属—芦苇，植被种类以沙漠旱生物种为主。如表 1 所示，高大沙山背风坡上部为一年生草本群落，包括沙米和碟果虫实；中上部为灌木与一年生草本群落，灌木为阿拉善沙拐枣，草本以沙米为主，碟果虫实较少；中下部为灌木与一年生草本群落，灌木以花棒为主，阿拉善沙拐枣偶有，草本以沙米为主，碟果虫实较少；底部为一年生草本群落，以矮小碟果虫实为主，沙米偶有。高大沙山迎风坡上部为一年生草本群落，以碟果虫实为主，沙米偶有；中上部为灌木、半灌木与一年生草本群落，灌木为阿拉善沙拐枣，半灌木白沙蒿偶有，草本以碟果虫实为主，沙米较少；中部为灌木、半灌木与一年生草本群落，灌木包括花棒、阿拉善沙拐枣，半灌木白沙蒿，草本以碟果虫实为主，沙米较少；中下部为半灌木与一年生草本群落，半灌木为白沙蒿，草本以碟果虫实为主，沙米偶有；底部为半灌木群落，半灌木为沙蒿，碟果虫实及沙米偶有。沙山底部到湖泊边缘水分条件好，但盐碱性增强，植被类型与沙山存在差异。湖泊东岸有两个群落类型：一是半灌木与多年生草本群落，半灌木为白沙蒿，多年生草本骆驼蓬，一年生草本白茎盐生草、雾冰藜及沙米；二是多年生与一年生草本群落，多年生草本有芦苇，一年生草本雾冰藜、白茎盐生草及沙米。

表 1 巴丹吉林沙漠伊和吉格德湖高大沙山区植被群落类型及样地分布

样地号	样地描述	纬度	经度	海拔/m	群落类型
M_1	高大沙山背风坡上部	39°46′49″	102°08′39″	1 430	沙蓬＋碟果虫实(*Agriophyllum squarrosum* & *Corispermum patelliforme*)
M_2	高大沙山背风坡中上部	39°46′48″	102°08′41″	1 390	阿拉善沙拐枣＋沙蓬(*Calligonum alaschanicum* & *A. squarrosum*)
M_3	高大沙山背风坡中下部	39°46′45″	102°08′48″	1 287	细枝岩黄芪＋沙蓬(*Hedysarum scoparium* & *A. squarrosum*)
M_4	高大沙山背风坡底部	39°46′42″	102°08′56″	1 205	碟果虫实(*C. patelliforme*)
M_5	高大沙山迎风坡上部	39°45′01″	102°09′34″	1 445	碟果虫实(*C. patelliforme*)
M_6	高大沙山迎风坡中上部	39°45′07″	102°09′28″	1 396	阿拉善沙拐枣＋碟果虫实(*C. alaschanicum* & *C. patelliforme*)
M_7	高大沙山迎风坡中部	39°45′17″	102°09′27″	1 326	细枝岩黄芪＋碟果虫实(*C. patelliforme*)
M_8	高大沙山迎风坡中下部	39°45′25″	102°09′21″	1 268	白莎蒿＋碟果虫实(*Artemisia blepharolepis* & *C. patelliforme*)
M_9	高大沙山迎风坡底部	39°45′38″	102°09′18″	1 179	白莎蒿(*A. blepharolepis*)
L_1	湖泊东岸	39°46′03″	102°09′54″	1 165	白莎蒿＋骆驼蓬(*A. blepharolepis* & *Peganum harmala*)
L_2	湖泊东岸	39°46′05″	102°09′44″	1 162	芦苇＋雾冰藜(*Phragmites australis* & *Bassia dasyphylla*)

总体来看，沙山植被群落分布的垂直变化特征及差异明显，主要表现在：(1) 沿沙山植被上限至下限群落类型不同，依次为草本群落—灌木群落—草本或半灌木群落，灌木多分布在沙山中部；(2) 背风坡草本除底部外，均以沙米为主，而迎风坡以碟果虫实为主；(3) 迎风坡有大量白沙蒿的分布，可以延伸至沙山中上部。沙山地区植被分布受风沙活动及水分等因素影响，植被群落外貌也是长期对环境的适应。例如沙山背风坡坡度大，为落沙坡，风沙活动较迎风坡显著，更适应沙米的生长，同时，沙山上部风沙活动更为强烈，水分条件更差，多草本生长。

2.2 总体群落多样性特征

沙漠地区自然环境恶劣，普遍植物种数较少，因而具有较低的生物多样性指数。研究区植被群落总体生物多样性数值如图 1 所示。

(1) 物种丰富度指数方面。① 数值变化于 2～5，沙山背风坡上部及底部、迎风坡上部数值最低，沙丘中部高，湖泊周围有较好的水分条件，数值也高；② 高大沙山迎风坡丰富度指数大于背风坡，这是由于白沙蒿在迎风坡的分布较广，可以延伸到沙丘中上部。

(2) Simpson 优势度指数方面。① 数值变化于 0.214～0.734，与物种丰富度指数呈相反变化规律，群落的物种数越多，优势种越不明显；② 迎风坡底部数值最高，因为该群落主要由单一的白沙蒿组成，草本高度及盖度很低。

(3) 物种多样性指数方面。① Shannon—Winner 指数变化于 0.538～1.573，Simpson 指数数值变化于 0.266～0.786 之间，两者具有相同的变化规律，与物种丰富度指数呈正相关关系，与物种优势度指数呈反相关关系。物种丰富度指数越高，显示群落的生物多样性指数也越高；② 高大沙山背风坡底部与迎风坡顶部均以碟果虫实为主的群落，迎风坡底部以白沙蒿为主的群落，具有较低的生物多样性指数，沙丘中部数值高，高大沙山迎风坡中部数值大于背风坡中部。

(4) 物种均匀度指数方面。① Pielou 指数变化于 0.480～0.988，Alatato 指数变化于 0.524～0.983，两者的变化规律相同，物种均匀度除受物种丰富度影响外，还受群落物种层次结构影响，同一坡面单一优势灌木群落或单一优势草本群落低于多灌木群落、多草

本群落;② 样地 M_3,M_6 及 M_7 由多灌木组成,数值高于相同坡面的 M_2,M_8 及 M_9 等单一灌木群落。多种优势草本群落 M_1,L_1 及 L_2 数值大于 M_4 及 M_5 等单一优势草本群落。湖泊周围植被群落也具有较高的均匀度,样地 L_1 大于 L_2,这是因为由芦苇组成的群落层次性更为明显。

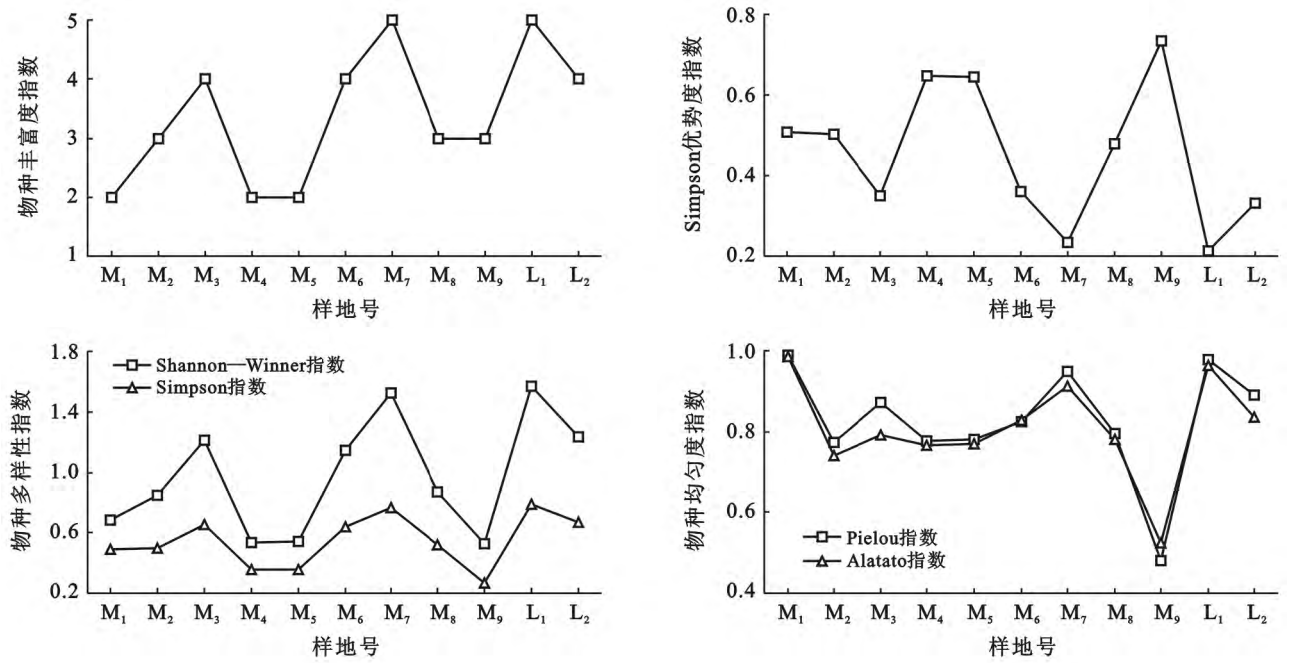


图 1　巴丹吉林沙漠伊和吉格德湖高大沙山区植物群落丰富度、优势度、多样性及均匀度指数

注:横坐标中样地号 M_1,M_2,M_3,M_4,M_5,M_6,M_7,M_8,M_9,L_1,L_2 的含义见表 1。下同。

2.3　分层次群落多样性特征

分别计算高大沙山区各植物群落灌木及草本重要值,对其进行多样性特征测度,结果如图 2 所示。由于各群落的灌木种类较少,仅 1 种灌木的群落,无法从重要值角度计算其相关多样性指数。Shannon—Winner 多样性指数方面:草本数值变化于 0.538～1.350,沙山两侧差异不大,湖泊周围草本最高;灌木(M_3,M_6 及 M_7 样地)数值变化于 0.428～1.013,迎风坡中部最高。Simpson 多样性指数方面:草本数值变化于 0.353～0.732,湖泊周围草本最高;灌木数值变化于 0.259～0.617,迎风坡中部最高。草本多样性指数的差异主要源于草本的生长状况。Pielou 均匀度指数方面:草本数值变化于 0.776～0.999,分层次均匀度无法反应草本的生长状况,例如 M_1 及 M_9 草本均具有较高的均匀度,但实际上 M_1 样地草本生长状况良好,植株较高,均值在 20 cm 以上,M_9 样地由单一白沙蒿群落组成,样地偶尔偶尔可见稀疏低矮的草本;灌木变化于 0.617～0.922,沙丘迎风坡中部最低。Alatato 均匀度指数方面:草本数值变化于0.765～0.999,灌木变化于 0.655～0.917。物种相对单一,导致分层次群落均匀度数值较大。

2.4　植被群落与高大沙山地貌形态关系

风成床面底形被认为是自然界复杂地貌系统中典型的自组织系统之一,具有有规律的、有序的结构,通常包括 3 个序列,风成沙波纹、简单个体沙丘、复合或复杂巨型沙丘,但对其形成演变过程的研究尚不深入[8]。董治宝等[8]采用沙丘高度—间距的对数相关关系分析了巴丹吉林沙漠沙漠高大沙山地貌形态格局,结果表明高大沙山地貌形态可以分为 3 级序列,第 1 级序列为叠加在沙山底部 1/4 处的小型简单沙丘,第 2 序列为叠加在序列 1 与沙丘峰脊之间的较高简单沙丘,第 3 级序列为高大沙丘。巴丹吉林沙漠高大沙山属于复合或复杂类新月形反向高大沙丘[8],其地貌形态格局形成也会对植被特征产生影响。野外调查过程中,沙山迎风坡植被群落分布特征与高大沙山地貌形态格局有很好的对应关系:(1) 迎风坡底部是以白沙蒿为主优势群落,Shannon—Winner 与 Simpson 多样性指数分别为 0.526,0.266,数值为迎风坡样地中最低值,与第 1 序列叠加的小型沙丘相对应。小型沙丘移动速度很快,响应季节及近几年内平均风况,沙山底部的植被群落正是对这种恶劣环境的反应。(2) 迎风坡中下部也是以白沙蒿为主的群落,但群落中草本的高度及盖度较高,可以响应第 1 序列与第 2 序列过渡区域的特征。(3) 迎风坡中部为灌木、半灌木与草本群落,Shannon—Winner 与 Simpson 多样性指数分别为 1.524,0.766,数值为迎风坡

样地中最高值，与第 2 序列叠加的较高简单沙丘对应。沙山中部风沙活动趋于减弱，沙丘移动速度变缓，可以响应更长时间风况的平均状况，迎风坡中部植物群落正是对这种较好环境的反应。(4) 沙山顶部一年生草本群落正是对峰脊区域更为恶劣环境的响应。植被是环境状况的反应，对植被更为深入的研究对于揭示高大沙山形成、演变及高大沙山与湖泊关系有重要的意义。

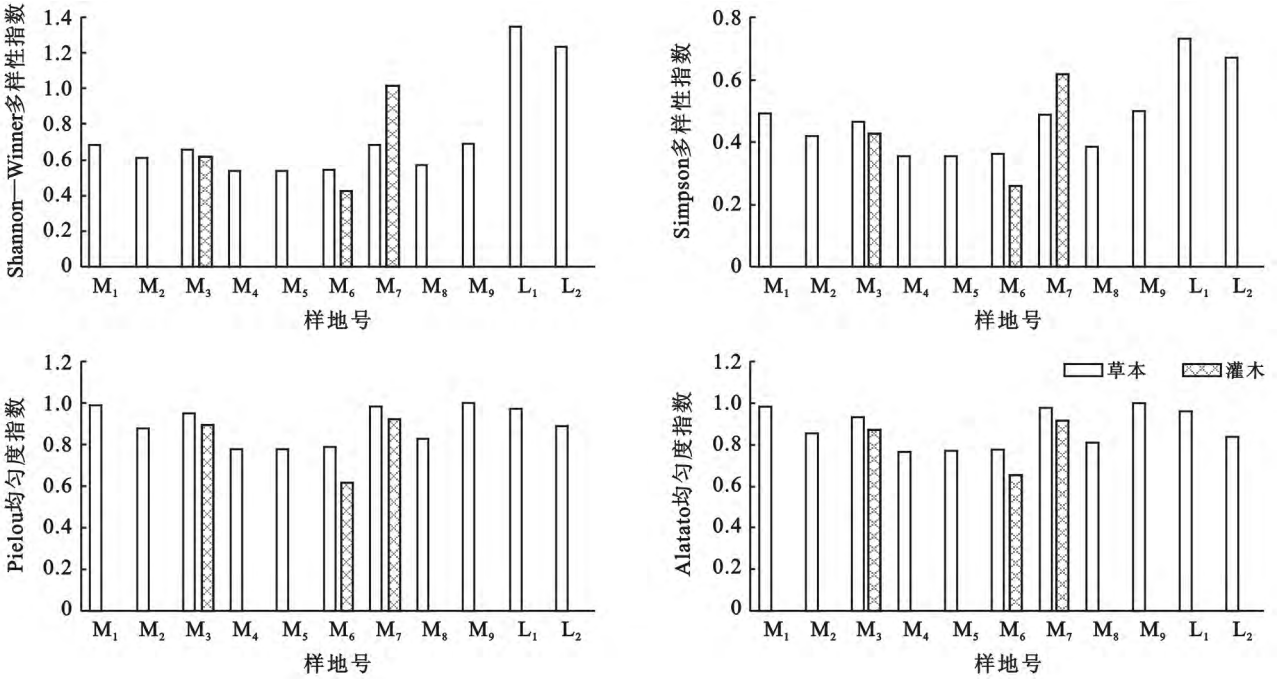


图 2 巴丹吉林沙漠伊和吉格德湖高大沙山区分层次植物群落多样性及均匀度指数

3 讨 论

研究区植被特征受整体高大沙山地貌形态影响。植被分布与高大沙山地貌形态格局的关系说明风沙活动因子的重要性，同时，沙山植被研究对于揭示沙山内部水分的运动特征，具有重要作用。目前关于沙山内部水分运动规律有两种不同的观点：(1) 认为巴丹吉林沙漠东南部有丰富的地下水资源，地下水通过水分蒸发上升到沙山内部，保持了沙山内部的湿润，湖泊是地下水出露的地区[11]；(2) 认为天然降水通过沙丘表层渗入沙山内部，在沙丘底部渗出形成湖泊[12]。整体巴丹吉林沙漠边缘及高大沙山区植被考察表明，该沙漠植被以旱生植被为主，东南部植被种类多于西北部。尽管沙漠东南部水分条件好于西北部，但不能表明该区有丰富的地下水资源。造成地区水分差异的主要因素应源于天然降水，巴丹吉林沙漠位于东亚夏季风边缘区，受夏季风影响小，降水少，变率大，植被生长状况同时也受其影响，沙漠西北部高大金字塔沙丘表面无植被分布正是对这种气候特征的反应。

以往研究表明高大沙山的形成可能经历了表层被钙质胶结层反复固定的过程，而钙质胶结层的产成是气候暖期植被大量生长作用的结果。一般而言，沙漠的形成大都是在气候冷期因风力及物理风化作用强盛而形成的，所以，在沙漠形成的更为广泛的时期，植被在高大沙山形成过程中有什么样的作用，也是一个重要问题。野外调查过程中，灌丛沙堆在沙漠边缘地区广泛分布，一些孤立的植被后部形成沙影区，同时，对沙山表面的植被根系挖掘过程中，发现背风坡大量植被根系大都有倾斜向上生长的趋势，即背风坡存在蠕移现象，结果表明现代沙山依然在活动，并缓慢向下风向移动。拜格诺认为湿沙层的存在是一种普遍现象，沙漠气温的变化对沙丘表层 20 cm 以下的影响微乎其微，沙丘内部温度的均匀性阻碍水分蒸发，使得水分得以保存数年，遇阻堆积形成的松软沙层(前积纹层)利于降水下渗[19]，那么这种条件就为温带沙漠植被的生长提供了有利条件。Tsoar[20] 认为沙漠中年降水大于 50 mm 地区的植被生长取决于输沙势(DP)和风向变率(RDP/DP)，即风能低于 500 DP 以及风向变率大的地区，在没有外界压力的条件下，沙丘表面可以生长植被。巴丹吉林沙漠南部满足降水和风能的这一特点。另外，实验室还分析了沙漠边缘植被及土壤肥力方面的关系，表明沙漠边缘土壤肥力很低，与植被生长状况大多没有显著的相关关系。

综合以上分析,笔者认为高大沙山形成除了受气候暖期植被形成钙质胶结层固定的影响外,在沙漠及沙山发育的更为广泛时期,沙山表面也可能分布有稀疏植被,而这些稀疏植被通过对沙粒的拦截作用,对高大沙山的高度增加起到了重要作用,高大沙山的形成是地质历史时期复杂环境条件下的结果,还需要更多的研究来讨论植被与高大沙山形成的关系。

4　结 论

(1) 高大沙山区植被以旱生物种为主,群落分布的垂直变化特征及差异明显,沿沙山上部至底部依次为草本群落—灌木群落—草本或半灌木群落,沙米多分布在背风坡,碟果虫实及白沙蒿多分布在迎风坡,风沙活动及水分因素是影响沙山植被群落特征的重要因素。

(2) 高大沙山区植物群落的总体丰富度指数 S 变化于 2～5,Simpson 优势度指数变化于 0.214～0.734,Shannon—Winner 多样性指数变化于0.538～1.573,Simpson 多样性指数数值变化于0.266～0.786,Pielou 均匀度指数变化于 0.480～0.988,Alatato 均匀度指数变化于 0.524～0.983。

(3) 分层次植被群落方面,Shannon—Winner 多样性指数草本变化于 0.538～1.350,灌木数值变化于 0.428～1.013,Simpson 多样性指草本变化于 0.353～0.732,灌木变化于 0.259～0.617,Pielou 均匀度指数草本变化于 0.776～0.999,灌木变化于 0.617～0.922,Alatato 均匀度指数草本变化于 0.765～0.999,灌木变化于 0.655～0.917。

(4) 高大沙山植被群落分布及多样性变化受整体高大沙山地貌形态格局影响,迎风坡植被特征与高大沙山地貌形态的第 1、第 2 序列有良好的对应关系。

植被因素在高大沙山—湖泊形成过程中可能起着重要的纽带作用,同时,对于揭示区域风沙地貌形成有着更为深远的影响。本次巴丹吉林沙漠高大沙山区植被考察仅局限于伊和吉格德湖地区是远远不够的,还需要更多关于高大沙山区植被考察的数据,来进行更详细的研究。

[参 考 文 献]

[1] Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Lv Ping, et al. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea[J]. Earth-Science Reviews, 2013,120(5): 20-39.

[2] 高全洲,董光荣,李保生,等. 晚更新世以来巴丹吉林南缘地区沙漠演化[J]. 中国沙漠,1995,15(4):345-352.

[3] Dong Guangrong, Gao Quanzhou, Zou Xueyong, et al. Climatic chang es on southern fringe of the Badain Jaran Desert since the Late Pleistocene[J]. Chinese Science Bulletin, 1996,41(10):837-842.

[4] Mischke S. New evidence for origin of Badain Jaran Desert of Inner Mongolia from granulom etry and thermoluminescence dating [J]. Journal of Palaeogeography, 2005,7(1):79-97.

[5] 邵天杰,赵景波,李恩菊,等. 巴丹吉林典型高大沙山粒度分布规律研究[J]. 地理科学,2010,30(5):790-795.

[6] 钱广强,董治宝,罗万银,等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1357-1364.

[7] Dong Zhibao, Wang Tao, Wang Xunming. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert[J]. Geomorphology, 2004,60(1/2):191-203.

[8] Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Luo Wanyin, et al. Geomorphological hierarchies for complex mega-dunes and their implications for mega-dune evolution in the Badain Jaran Desert[J]. Geomorphology, 2009,160(3/4): 180-185.

[9] 张伟民,王涛. 巴丹吉林沙漠高大沙山形成演化初步探讨[J]. 中国沙漠,2005,25(2):281-286.

[10] Yang Xiaoping, Scuderi L, Liu Tao, et al. Formation of the highest sand dunes on Earth[J]. Geomorphology, 2011,135(10):108-116.

[11] 陈建生,赵霞,盛雪芬,等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究[J]. 科学通报,2006,51(23):2789-2796.

[12] 赵景波,邵天杰,侯雨乐,等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区沙层含水量与水分来源探讨[J]. 自然资源学报,2006,51(23):694-720.

[13] 邵天杰,赵景波,董治宝. 巴丹吉林沙漠湖泊及地下水化学特征[J]. 地理学报,2011,66(5):662-672.

[14] 郭永海,王海龙,董建楠,等. 关于巴丹吉林沙漠湖泊形成机制的初步看法[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2012,37(2):226-282.

[15] 邱新法,曾燕,缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. 地理学报,2001,56(3):316-332.

[16] 王育松,上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报:自然科学版,2010,33(2):312-316.

[17] 高贤明,马克平,陈灵芝. 暖温带若干落叶阔叶林群落物种多样性及其与群落动态的关系[J]. 植物生态学报,2001,25(3)283-290.

[18] 钱迎倩,马克平. 生物多样性研究的原理与方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994:141-165.

[19] Bagnold R A. 风沙和荒漠沙丘物理学[M]. 钱宁,林秉南,译. 北京:科学出版社,1959:227-279.

[20] Tsoar H. Sand dunes mobility and stability in relation to climate[J]. Physical A, 2005,35(1):50-56.