

李星,马媛,李星,等. 乌兰布和沙漠植物群落相异性及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 187-194.

乌兰布和沙漠植物群落相异性及其影响因素

李星^{ab}, 马媛^{ab}, 李星^{ab}, 高君亮^{ab}, 辛智鸣^{ab}, 卢琦^{ac}

(中国林业科学研究院 a. 沙漠林业实验中心, b. 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, c. 荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: β 多样性反映群落间物种组成的相异性,是生态学研究热点问题。通过对乌兰布和沙漠46个样地植物群落的调查数据进行分析,运用Sørensen相异性指数衡量该地区植物群落 β 多样性格局,并通过主成分分析、Mantel及Partial Mantel检验等方法来衡量各环境因子差异(包括气候和土壤)和群落地理距离对该区域植物群落 β 多样性格局的影响。结果表明:乌兰布和沙漠植物群落之间物种组成差异较大,物种周转(β_{sim})主导植物群落 β 多样性。气候因素、土壤因素和地理距离对植物群落 β 多样性及其周转组分有显著影响,物种周转对其响应与植物群落 β 多样性保持一致。乌兰布和沙漠植物群落物种在空间上的周转是环境限制和扩散限制综合作用的结果,环境过滤对植物群落 β 多样性及组分的影响超过扩散限制。

关键词: 植物群落 β 多样性; 环境过滤; 扩散限制; 周转; 嵌套; 乌兰布和沙漠

文章编号: 1000-694X(2022)05-187-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00037

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

0 引言

生物多样性对环境因子的响应已经成为生态研究的热点^[1-2]。 β 多样性表示不同群落间物种组成差异,是联系 α 多样性与 γ 多样性的桥梁和纽带^[3-4],能较为直观地反映环境与物种多样性的相互作用^[5]。 β 多样性格局的形成可以分为两种途径。一是物种的周转,表示不同群落间物种的替换;二是物种的嵌套,表示一个低丰富度的群落是另一高丰富度群落非随机物种丢失的结果,前者是后者的子集,形成嵌套^[6]。为了量化两种途径,基于Sørensen相异性指数, β 多样性可被分解为周转和嵌套两部分^[7-8]。该分解方法有利于我们更好地了解 β 多样性的形成机制。

一般认为物种 β 多样性主要由生态位过程和扩散过程共同作用形成^[9-10]。按照生态位理论,历史过程决定了区域的物种库,环境因素决定着群落中物种的共存^[11]。不同的物种有着各自适应的生境,生境差异越大,物种组成差异也越大^[12]。气候作为重要的环境因子,对不同物种空间更替的作用一直是研究的热点^[13-14]。除了气候,土壤异质性在小尺度上

也是影响植被特征的重要因子^[15]。中性理论认为,物种随机扩散过程是植物群落构建的重要机制^[16]。在研究群落周转中,广泛采用地理距离来表征物种扩散限制^[17]。在扩散限制的影响下,群落物种组成的相似性随着地理距离增加而减小^[12]。环境过滤和扩散限制对植物群落 β 多样性的形成至关重要。

干旱区、半干旱区占全球陆地面积的25%,是陆地生态系统的重要组成部分。干旱区、半干旱区生态系统脆弱,是研究生物多样性的重点区域^[18]。荒漠植被的生存和分布受到气候、土壤和水分的影 响^[19-20]。乌兰布和沙漠是中国第八大沙漠,目前对该区域物种组成、群落类型和多样性的调查已经比较充分^[21-23]。这些研究为乌兰布和沙漠植被资源保护奠定了基础。但是,在乌兰布和沙漠中植物群落 β 多样性形成机制未见报道。本研究通过分析乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性的格局及影响因素,定量评价样地间气候、土壤和地理距离与植物群落 β 多样性的关系,以期深入了解该区域植物群落对特殊环境的适应及群落维持机制,为沙漠地区的植物群落 β 多样性形成和维持机制的研究提供事实证据。

收稿日期: 2021-12-27; 改回日期: 2022-03-11

资助项目: 科技基础资源调查专项(2019FY102002-5); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2019ZD002-01)

作者简介: 李星(1994—),男,内蒙古人,助理工程师,研究方向为植被生态学。E-mail: 1172303186@qq.com

通信作者: 辛智鸣(E-mail: xzmlkn@163.com)

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

乌兰布和沙漠(海拔1 030—1 474 m)位于内蒙古自治区西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市境内,南连贺兰山、吉兰泰盐池,西至阿木乌苏拉乌山、哈乌拉山、浩温多尔山,东临黄河磴口—临河段,北到狼山、河套平原,面积约10 000 km²。沙漠南部多为戈壁、盐碱地和沙山,北部多为半流动和半固定沙地^[24-25]。地貌以沙漠、山地和戈壁为主。该地区属温带大陆性气候,年降水量110—160 mm,年潜在蒸发量2 400—3 200 mm,降水多在6—9月;年平均气温7.5—8.5 °C,昼夜温差较大。主要土壤为风沙土^[26]。优势植物为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、白刺(*Nitraria tang-*

utorum)、霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)和芦苇(*Phragmites australis*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与植被调查

本次调查于2020年8月中旬进行,结合遥感影像,设计调查路线。按15 km×15 km网格调查,排除分布在人工绿洲和流动沙丘的样点,共计46个调查点(图1)。在每个调查点上,选择典型荒漠植物群落,布设一块100 m×100 m的样方,样方内沿对角线设置3个10 m×10 m的小样方,记录每个小样方内所有灌木层的种名、高度、冠幅;记录小样方内所有维管植物的种名、高度、多度、丛幅,汇总每个调查点出现的植物种数;同时利用GPS测定调查点的地理坐标和海拔,记录坡度、坡向、坡位和地形等信息。

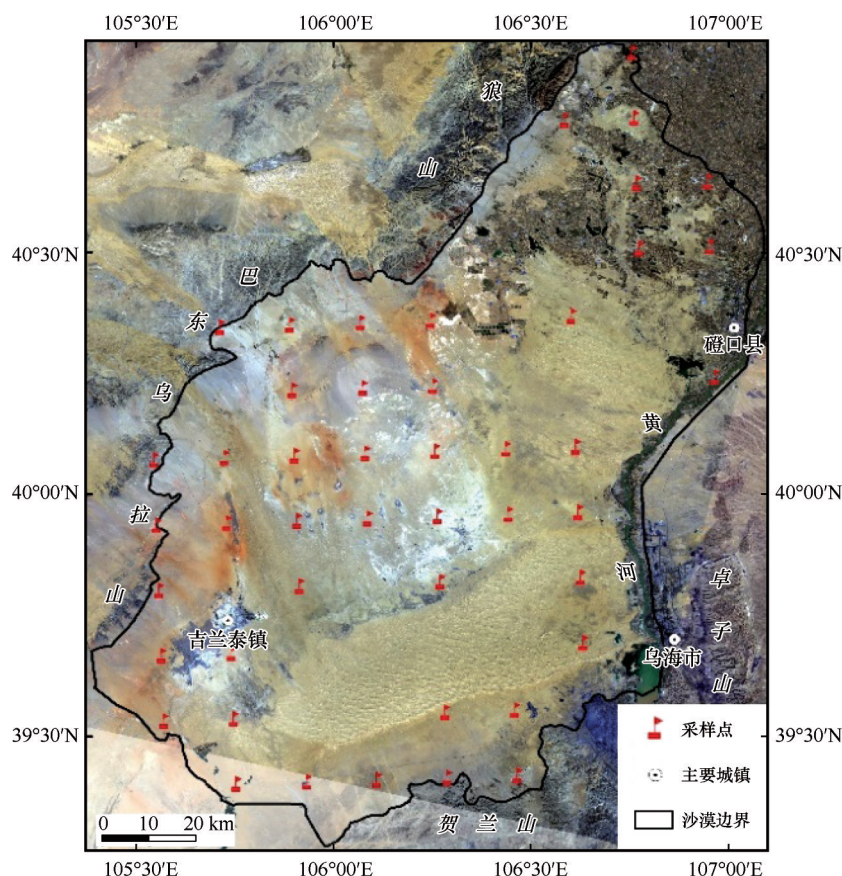


图1 乌兰布和沙漠研究区采样点分布

Fig.1 Distribution map of sampling points in Ulan Buh Desert

1.2.2 土壤调查与取样

在调查点的每个小样方中,沿对角线用土钻钻取3钻土,取样深度为10 cm,将每个小样方的土壤样品混合均匀,保证每个调查点有3个土壤样品用

于理化性质测定。将混合均匀的土壤样品带回实验室风干,过2 mm土壤筛,剔除土壤中的根系和杂质等。经H₂SO₄-HClO₄法消煮后,用钼锑抗比色法测定全磷(STP)含量;经H₂SO₄-H₂O₂法消煮后,运用

凯氏定氮法测定全氮(STN);经 HF-HClO₄法消煮后,运用火焰光度计法测定全钾(STK);有机质(SOM)采用重铬酸钾氧还原滴定法测定;速效磷(SAP)测定用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法;速效钾(SAK)测定用醋酸铵浸提-火焰光度法^[27]。

1.2.3 气候数据获取

本文所需的气候数据从世界气候数据网站(<http://www.worldclim.org/>)中获取,根据样地经纬度坐标,用R语言 raster包中 cellFromXY 函数确定采样点栅格位置提取气候因子,包括年平均气温(MAT)、最暖月最高气温(MTWM)、最冷月最低气温(MTCM)、年降水量(MAP)、最湿润月降水量(PWM)、最干旱月降水量(PDM)、最湿润季降水量(PWQ)和最干旱季降水量(PDQ)。

1.2.4 数据分析

本文基于物种有无计算 Sørensen 相异性指数,使用R语言中 betapart包^[28]将总体 β 多样性 β_{sor} 分解为物种周转(β_{sim})和嵌套(β_{nes})两部分。

$$\text{Sørensen 相异性指数 } \beta_{sor} = \frac{b + c}{2a + b + c} \quad (1)$$

$$\text{周转组分 } \beta_{sim} = \frac{\min(b, c)}{a + \min(b, c)} \quad (2)$$

$$\text{嵌套组分 } \beta_{nes} = \beta_{sor} - \beta_{sim} \quad (3)$$

式中: a 为群落中共有物种数; b 、 c 为群落中特有种数; $\min(b, c)$ 表示 a 、 b 两个数中的最小值。

为了研究环境因子与植物群落 β 多样性及其组分之间的关系,首先,运用主成分分析对所获得的气候、土壤和海拔数据进行筛选,将筛选后的环境因子根据性质分别划入气候因素和土壤因素中,对获得的气候因素和土壤因素进行标准化处理,然后分别计算其欧式距离矩阵,构建气候差异矩阵和土壤差异矩阵。使用R语言中的 fossi包基于样地经纬度计算不同样地的地理距离矩阵。

采用 Mantel 分别检验植物群落 β 多样性与气候、土壤因素和地理因素的相关关系;使用 Partial Mantel 控制特定变量对其他特定变量与响应变量(植物群落 β 多样性及其组分)之间相关性的影响,并评估两个变量(如植物群落 β 多样性与气候因素)之间线性关联的强度。

所有的计算均通过 R4.1.2 软件完成,并利用 R 软件“Violin plot包”完成基于 Sørensen 相异性指数算法的 β_{sim} 和 β_{nes} 及其在 β_{sor} 中所占比例分布图的绘制,利用 SigmaPlot 14.0 完成柱状图。

2 结果与分析

2.1 植物群落 β 多样性及组分

此次调查共记录种子植物 65 种,隶属于 16 科 52 属。其中裸子植物 1 种,为膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*);被子植物 15 科 51 属(双子叶植物 13 科 39 属,单子叶植物 2 科 12 属)。数量优势科依次是藜科、禾本科、豆科、蒺藜科和菊科,共计 5 科,各占总科、总属、总种数的 31.25%、71%、70.8%。这几个科在区域群落物种组成上处于核心地位。

采用 Sørensen 相异性指数进行计算的结果表明, β_{sor} 最大值为 1,最小值为 0.22,平均值为 0.81; β_{sim} 最大值为 1,最小值为 0,平均值为 0.71, β_{sim} 在 β_{sor} 的比例平均为 84%; β_{nes} 最大值为 1,最小值为 0,平均值为 0.1, β_{nes} 在 β_{sor} 的比例平均为 16%(图 2)。这说明乌兰布和沙漠具有明显的物种更替,在研究区 β 多样性的两个组分之中,相比于嵌套,物种的周转更为重要,乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性可能主要来自物种周转。

2.2 环境因子对植物群落 β 多样性的影响

对可能影响乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性的环境因子进行 KMO 和 Bartlett 的球形检验(表 1)。特征值大于 1 的 4 个主成分的贡献率分别为 35.8%、17.3%、14.6% 和 7.8%,累积贡献率达 75.5%。第 1 主成分特征值为 5.37,载荷量较大的 3 个因子是年降水量(-0.413)、最湿润月降水量(-0.406)和最湿润季降水量(-0.412)。第 2 主成分的特征值为 2.60,载荷量较大的因子是土壤有机质(-0.555)。第 3 主成分的特征值为 2.19,载荷量较大的是最干旱月降水量(0.586)和最干旱季降水量(0.584)。第 4 主成分的特征值为 1.17,载荷量较大的因子是土壤全钾(-0.66)。影响乌兰布和沙漠 β 多样性的主要环境因子是年降水量、最湿润月降水量、最湿润季降水量、最干旱季降水量、最干旱月降水量、土壤有机质和土壤全钾。

2.3 气候、土壤和空间距离对植物群落 β 多样性及组分的相对作用

Mantel 及 Partial Mantel 检验结果显示植物群落 β 多样性(β_{sor})和周转(β_{sim})与气候因素、土壤因素和地理距离均显著正相关(图 3)。

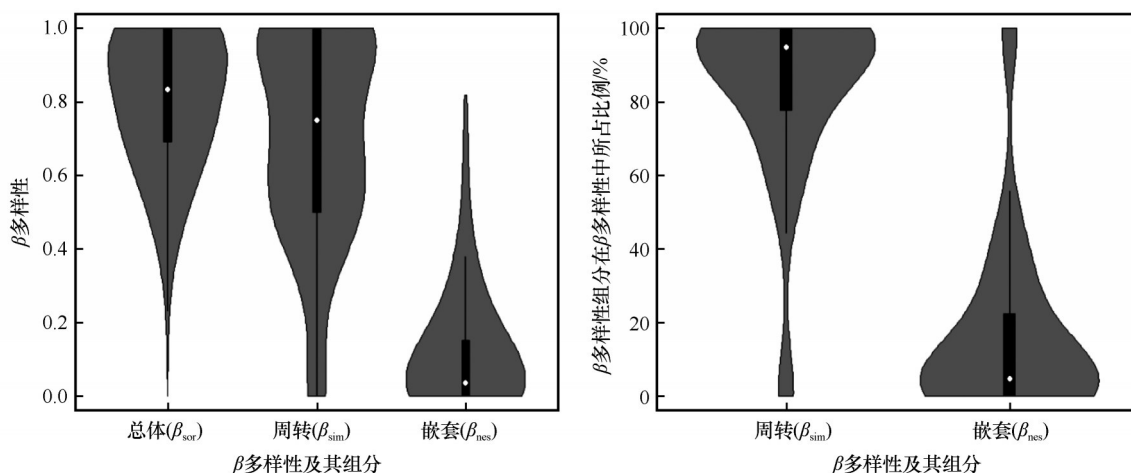


图2 基于Sørensen指数算法的周转组分(β_{sim})和嵌套组分(β_{nes})及其在总体 β 多样性(β_{sor})中所占比例分布

Fig.2 Distribution of β_{sim} , β_{nes} and their proportion in β_{sor} based on Sørensen index

表1 乌兰布和沙漠环境因子的主成分分析

Table 1 Principal component analysis of environmental factors in Ulan Buh Desert

环境因子	主成分			
	1	2	3	4
年均气温(MAT)	0.358	0.143	0.222	0.16
最暖月最高气温(MTWM)	0.330	0.139	0.308	<0.1
最冷月最低气温(MTCM)	0.226	<0.1	-0.272	0.454
年降水量(MAP)	-0.413	<0.1	<0.1	0.114
最湿润月降水量(PWM)	-0.406	<0.1	<0.1	0.109
最干旱月降水量(PDM)	-0.151	<0.1	0.586	<0.1
最湿润季降水量(PWQ)	-0.412	<0.1	<0.1	0.123
最干旱季降水量(PDQ)	-0.181	<0.1	0.584	<0.1
全氮(STN)	<0.1	-0.365	<0.1	<0.1
全磷(STP)	0.164	-0.481	<0.1	<0.1
全钾(STK)	0.150	-0.219	<0.1	-0.66
有机质(SOM)	<0.1	-0.555	<0.1	<0.1
速效磷(SAP)	0.149	-0.231	<0.1	0.444
速效钾(SAK)	<0.1	-0.399	<0.1	0.244
海拔	-0.263	-0.149	-0.277	-0.152
特征值	5.37	2.60	2.19	1.17
贡献率/%	35.8	17.3	14.6	7.8
累积贡献率/%	35.8	53.1	66.7	75.5

当控制了气候因素的影响后,土壤因素与 β_{sor} 和 β_{sim} 间的正相关关系($r=0.18$ 和 $r=0.16$, $P<0.01$)显著减弱($r=0.06$ 和 $r=0.064$, $P>0.05$),地理距离与 β_{sor} 和 β_{sim} 间的正相关关系($r=0.15$ 和 $r=0.13$, $P<0.01$)显著减弱($r=0.02$ 和 $r=0.01$, $P>0.05$)。与之相反,即使控

制土壤因素和地理距离的影响,气候因素与 β_{sor} 和 β_{sim} 间的正相关关系仍然显著($r=0.20$ 和 $r=0.16$, $P<0.01$; $r=0.215$ 和 0.17 , $P<0.01$)。

当控制了土壤因素的影响后,地理距离与群落 β_{sor} 和 β_{sim} 正相关性关系($r=0.15$ 和 $r=0.13$, $P<0.01$)显著减弱($r=-0.017$ 和 $r=-0.018$, $P>0.05$)。

控制了地理距离影响后,土壤因素与群落 β_{sor} 和 β_{sim} 的正相关性关系($r=0.18$ 和 $r=0.16$, $P<0.01$)显著减弱($r=0.10$ 和 $r=0.10$, $P>0.05$)。

气候因素、土壤因素和地理距离对 β_{nes} 无明显影响。

偏相关分析的结果表明气候因素是影响群落 β_{sor} 和 β_{sim} 以及地理距离与 β_{sor} 和 β_{sim} 之间关系的最重要因素。

3 讨论

3.1 乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性及其组分

β 多样性不仅代表着一个地区物种多样性的分布情况,而且还体现着物种与环境之间的关系^[3,10,16,29]。通过对乌兰布和沙漠植物群落的研究,利用Sørensen相异性指数来表征植物群落 β 多样性。结果发现该区域植物群落相异性指数较大(均值为0.82,图2),表明该区域植物群落的物种组成之间存在较大差异^[30]。为了量化植物群落 β 多样性的过程,将总体 β 多样性(β_{sor})分解为周转(β_{sim})和嵌套(β_{nes})两部分,发现周转占有很大比例,嵌套比例较低。这与库姆塔格沙漠南缘的植物群落 β 多样性研究结果一致^[30]。因此乌兰布和沙漠的植物群落 β

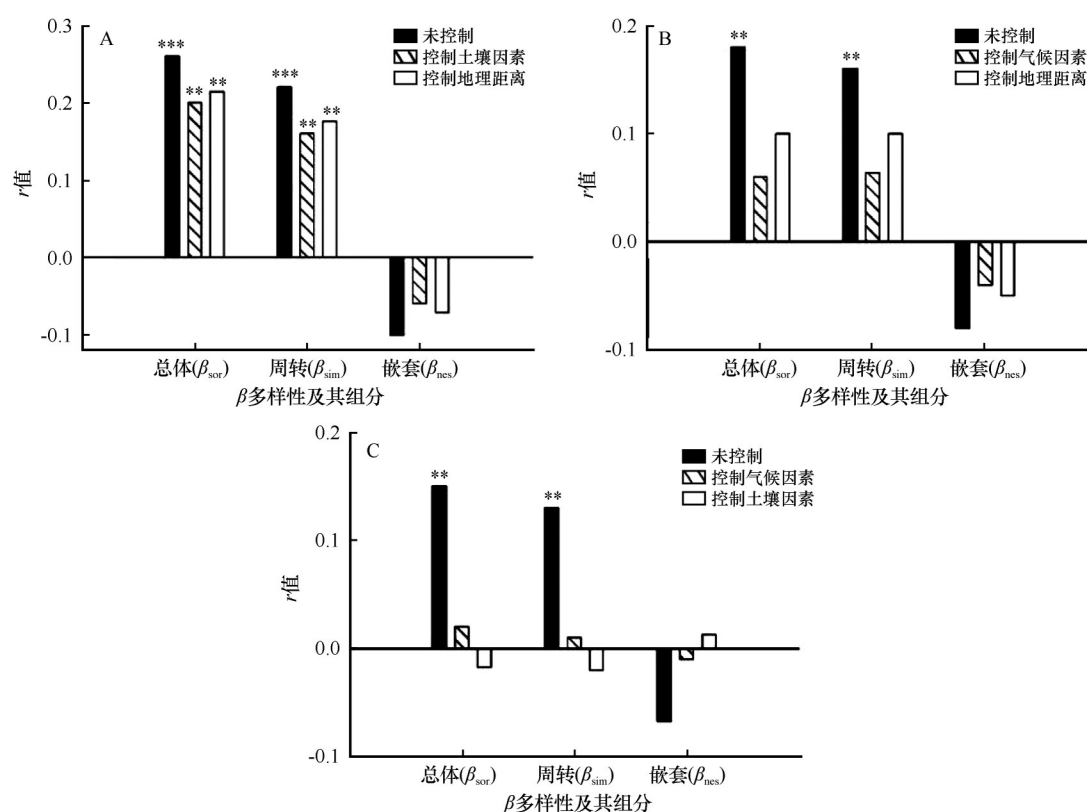


图3 群落 β 多样性及其组分与气候因素(A)、土壤因素(B)和地理距离(C)间Mantel及Partial Mantel检验的相关性(*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$)

Fig.3 Mantel and Partial Mantel tests (*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$) showed that β diversity and its components were correlated with climatic factors (A), soil factors (B) and geographical distance (C)

多样性可能主要受植物群落物种在空间上或群落间的周转影响。

3.2 环境及地理因素对乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性及其组分的影响

通过主成分分析,最终筛选出影响乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性的主要气候因子,主要包括年降水量、最湿润月降水量、最湿润季降水量、最干旱季降水量、最干旱月降水量,说明这些气候因子是造成植物群落差异的重要变量。有研究发现,降水是影响干旱区和半干旱区生态系统的重要因子^[31-32]。在乌兰布和沙漠,降水也是影响本地区植物群落 β 多样性和周转组分的主要气候因子。我们调查发现,降水差异影响植物的分布,沙冬青群落生长在降水较好的条件下,白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)群落的生境条件极为恶劣。此外,水资源的利用方式也会影响植物群落的物种组成,如荒漠区深根系的植物利用的是地下水,浅根系植物利用的是土壤表层水和地下水,水分利用策略也

使物种组成有较大差异^[33]。

一些研究表明,土壤的变化在小尺度上是植被特征的重要决定因子^[15]。本研究结果表明,土壤因素对植物群落 β 多样性及周转组分有显著影响,但对嵌套组分影响不显著。相对气候而言,土壤因素相关性较低,这与在古尔班通古特沙漠的研究结果相同^[34]。这说明在大尺度上,沙漠土壤异质性对植被组成变化影响较小。

目前学者们普遍认为扩散限制和生境过滤对植物群落 β 多样性的形成均起作用^[16,10,35]。但有研究表明,地理距离对植物群落 β 多样性的形成的作用不显著^[36]。本研究结果表明,地理距离的改变对乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性存在显著作用,随着地理距离的增大,植物群落的相异性增大。进一步分析表明,地理距离与植物群落 β 多样性的相关系数始终低于环境因子的影响。这说明在所研究的范围内,生境条件复杂多变,如梭梭、沙冬青和白刺等群落,其生境中沙粒含量较高;盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、马蔺(*Iris lactea*)和红砂群落等,其生

境中土壤水分、盐分和黏粒含量较高^[21]。地理距离的改变对植物群落结构有一定的影响,但不是主导因素。在库姆塔格沙漠南缘、古尔班通古特沙漠和新疆艾比湖荒漠植被的研究也证实环境条件是影响荒漠植物群落 β 多样性的主导因素^[10,33-34]。

3.3 环境过滤和扩散限制对植物群落 β 多样性的相对作用

一般认为 β 多样性主要由扩散过程和生态位过程两种机制共同作用形成^[9-10]。生态位理论认为物种组成差异由生境变化导致,扩散理论认为物种分布格局完全由其扩散能力确定^[5]。扩散限制和生境过滤并不是互斥关系,有时同时起着作用^[37]。本文研究表明环境差异和地理距离均与乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性及其组分存在显著的相关性(图3)。在荒漠生态系统中,干旱起着强烈的环境过滤作用^[38]。随着干旱程度的增加,有利于比叶面积小和根系能在短时间获取最大养分和水分的植物生存^[39-40]。植物(如梭梭、沙拐枣等)会通过减少地上生物量的分配和叶片退化减少水分的散失,并把更多光合作用产物分配给地下部分^[41]。物种相似性随着地理距离的增大而减小,说明扩散限制在植物群落 β 多样性中起一定作用。但二者对于研究区植物群落 β 多样性及其周转组分的影响存在差异,与气候因素、土壤因素的相关系数分别为0.26、0.18,与地理距离的相关系数是0.16(图3)。环境筛选作用远大于扩散限制,在荒漠区的库姆塔格沙漠南缘和古尔班通古特沙漠研究中也得到过类似结果^[30,34]。这说明在环境贫瘠、物种结构简单的乌兰布和沙漠,环境过滤作用对植物群落 β 多样性的作用大。值得注意的是,在研究区域中物种周转主导植物群落 β 多样性的变化,且对环境变量的响应与植物群落 β 多样性一致。因此,随着环境距离(包括气候和土壤等环境条件的差异)和地理距离的增加,空间异质性也明显增强,植物种子的扩散受到限制^[42],在长期自然选择和群落演替中,不同生境下形成与之相适应的物种^[43]。本研究表明,以环境过滤为主,加之扩散限制共同影响着乌兰布和沙漠的植物群落 β 多样性的格局,即生态位理论和中性理论共同驱动乌兰布和沙漠植物群落的构建。

本研究虽发现环境过滤和扩散限制是影响植物群落 β 多样性及周转(β_{sim})的重要过程,但相关性均较低。这表明存在未测量的因子起着作用^[10]。

如植物群落的自身特性^[36,44]、人为干扰^[34]、研究尺度^[45-47]都会在不同程度上影响植物群落 β 多样性。

4 结论

本研究通过对乌兰布和沙漠植物群落进行调查,证实了环境过滤和扩散限制在植物群落 β 多样性及其组分中的作用,为该地区植物群落构建提供了理论依据。乌兰布和沙漠植物群落的 β 多样性主要来源于物种周转(β_{sim}),物种嵌套起的作用很小。环境过滤和扩散限制对乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性及其周转(β_{sim})组分均有显著影响。随着气候因素、土壤因素和地理距离差异的增大,乌兰布和植物群落的相异性指数随之上升。在这3类因素中,气候因素作用最强,土壤因素和地理距离也起一定作用。这些结果说明,乌兰布和沙漠植物群落 β 多样性及其周转组分(β_{sim})受环境过滤和扩散限制的共同影响,但在植物群落 β 多样性形成中环境过滤占有较大比重,环境的异质性是影响该地区物种差异的重要因素。

参考文献:

- [1] 秦洁,司建华,贾冰,等.巴丹吉林沙漠植被群落特征与土壤水分关系研究[J].干旱区研究,2021,38(1):207-222.
- [2] 朱军涛,于静洁,王平,等.额济纳荒漠绿洲植物群落的数量分类及其与地下水环境的关系分析[J].植物生态学报,2011,35(5):480-489.
- [3] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity [J]. TAXON, 1972, 21(2/3): 213-251.
- [4] Condit R, Pitman N, Leigh E G, et al. Beta-diversity in tropical forest trees [J]. Science, 2009, 90(3): 663-674.
- [5] 彭思羿,胡广,于明坚.千岛湖岛屿维管植物 β 多样性及其影响因素[J].生态学报,2014,34(14):3866-3872.
- [6] Lennon J J, Koleff P, Greenwood J J D, et al. The geographical structure of British bird distributions: diversity, spatial turnover and scale [J]. Journal of Animal Ecology, 2001, 70(6): 966-979.
- [7] Baselga A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity [J]. Global Ecology & Biogeography, 2010, 19(1): 134-143.
- [8] James A, Pitchford J W, Plank M J. Disentangling nestedness from models of ecological complexity [J]. Nature, 2012, 487(7046): 227-230.
- [9] Soininen J, McDonald R, Hillebrand M. The distance decay of similarity in ecological communities [J]. Ecography, 2007, 30(1): 3-12.
- [10] Legendre P, Mi X, Ren H, et al. Partitioning beta diversity in a subtropical broadleaved forest of China [J]. Ecology, 2009, 90

- (3):663-674.
- [11] Blundo C, González-Espinosa M, Malizia L R. Relative contribution of niche and neutral processes on tree species turnover across scales in seasonal forests of NW Argentina [J]. *Plant Ecology*, 2016, 217(4):359-368.
- [12] 牛克昌, 刘怿宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论[J]. *生物多样性*, 2009, 17(6):579-593.
- [13] Qing Z, Xiangyang H, Yonghong L F, et al. Alpha, Beta and Gamma diversity differ in response to precipitation in the Inner Mongolia grassland [J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(3):e93518.
- [14] Peng Y, Feng J, Sang W, et al. Geographical divergence of species richness and local homogenization of plant assemblages due to climate change in grasslands [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2022, 136: 1-14.
- [15] Miki T, Kondoh M. Feedbacks between nutrient cycling and vegetation predict plant species coexistence and invasion [J]. *Ecology Letters*, 2002, 5(5):624-633.
- [16] Hubbell S P. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography: reply [J]. *Ecology*, 2004, 85(11):3175-3178.
- [17] Catano C P, Dickson T L, Myers J A, et al. Dispersal and neutral sampling mediate contingent effects of disturbance on plant beta-diversity: a meta-analysis [J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(3):347-356.
- [18] Whitford W G. *Ecology of Desert Systems* [M]. San Diego, USA: Academic Press, 2002.
- [19] Wang J, Chen C, Li J, et al. Different ecological processes determined the alpha and beta components of taxonomic, functional, and phylogenetic diversity for plant communities in dryland regions of Northwest China [J]. *PEER Journal*, 2019, 6:e6220.
- [20] Li L, Wang Z, Zerbe S, et al. Species richness patterns and water-energy dynamics in the drylands of Northwest China [J]. *PLoS One*, 2013, 8(6):e66450.
- [21] 靳虎甲, 马全林, 张德魁, 等. 乌兰布和沙漠典型灌木群落结构及数量特征 [J]. *西北植物学报*, 2012, 32(3):579-588.
- [22] 马全林, 张德奎, 袁宏波, 等. 乌兰布和沙漠植被数量分类及环境解释 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(9):160-167.
- [23] 董雪, 辛智鸣, 段瑞兵, 等. 乌兰布和沙漠典型灌木群落多样性及其生态位 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37(4):1009-1017.
- [24] 贾鹏, 王乃昂, 程弘毅, 等. 基于3S技术的乌兰布和沙漠范围和面积分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12):131-138.
- [25] 春喜, 陈发虎, 范育新, 等. 乌兰布和沙漠的形成与环境变化 [J]. *中国沙漠*, 2007, 27(6):927-931.
- [26] 马全林, 袁宏波, 张锦春, 等. 乌兰布和沙漠植被 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2018.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] Baselga A, Cdl O. Betapart: an R package for the study of beta diversity [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(5):808-812.
- [29] Legendre P, Borcard D, Peres-Nieto P R. Analyzing beta diversity: partitioning the spatial variation of community composition data [J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75(4):435-450.
- [30] 杨欢, 王寅, 王健铭, 等. 环境过滤和扩散限制对库姆塔格沙漠南缘植物群落 β -多样性的影响 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3):147-154.
- [31] Pueyo Y, Moret-Fernández D, Saiz H, et al. Relationships between plant spatial patterns, water infiltration capacity, and plant community composition in semi-arid Mediterranean ecosystems along stress gradients [J]. *Ecosystems*, 2013, 16(3):452-466.
- [32] Jordan S E, Palmquist K A, Bradford J B, et al. Soil water availability shapes species richness in mid-latitude shrub steppe plant communities [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2020, 31(4):12874.
- [33] Jiang L, Lv G, Gong Y, et al. Characteristics and driving mechanisms of species beta diversity in desert plant communities [J]. *PLoS One*, 2021, 16(1):e0245249.
- [34] 赵怀宝, 刘彤, 雷加强, 等. 古尔班通古特沙漠南部植物群落 β 多样性及其解释 [J]. *草业学报*, 2010, 19(3):29-37.
- [35] Harms K E, Condit R, Hubbell S P, et al. Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha Neotropical forest plots [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89(6):947-959.
- [36] 翁昌露, 张田田, 巫东豪, 等. 古田山10种主要森林群落类型的 α 和 β 多样性格局及影响因素 [J]. *生物多样性*, 2019, 27(1):33-41.
- [37] Tuomisto H, Ruokolainen K, Yli-Halla M. Dispersal, environment and floristic variation of western Amazonian forests [J]. *Science*, 2003, 5604(299):241-244.
- [38] Berdugo M, Delgadobaquerizo M, Soliveres S, et al. Global ecosystem thresholds driven by aridity [J]. *Science*, 2020, 6479(347):787-790.
- [39] Poorter H, Niinemets Ü, Poorter L, et al. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis [J]. *New Phytologist*, 2010, 182(3):565-588.
- [40] Schenk H J, Jackson R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems [J]. *Journal of Ecology*, 2002, 90(3):480-494.
- [41] 霍佳璇, 任梁, 潘莹萍, 等. 柴达木盆地荒漠植物功能性状及其对环境因子的响应 [J]. *生态学报*, 2022(11):1-10.
- [42] 张森森, 秦浩, 王烨, 等. 汾河中游湿地植被 β 多样性 [J]. *生态学报*, 2016, 36(11):3292-3299.
- [43] 李新辉, 刘延虹, 刘晔, 等. 地理距离及环境差异对云南元江干热河谷植物群落 β 多样性的影响 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(4):399-406.
- [44] 谭珊珊, 叶珍林, 袁留斌, 等. 百山祖自然保护区植物群落 β 多样性 [J]. *生态学报*, 2013, 33(21):6944-6956.
- [45] Jeannine C B, Adrienne K, Brianna M. Phylogenetic structure of floridian plant communities depends on taxonomic and spatial scale [J]. *Ecology*, 2006, 87(7):S109-S122.
- [46] Hong Q, Kissling W D. Spatial scale and cross-taxon congruence of terrestrial vertebrate and vascular plant species richness in China [J]. *Ecology*, 2010, 91(4):1172-1183.

- [47] Zhang J L, Nathan G, Swenson, et al. Phylogenetic beta diversity in tropical forests: implications for the roles of geographical and environmental distance[J]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2013, 51(1): 71–85.

Plant community heterogeneity and its influencing factors in the Ulan Buh Desert

Li Xing^{ab}, Ma Yuan^{ab}, Li Xing^{ab}, Gao Junliang^{ab}, Xin Zhiming^{ab}, Lu Qi^{ac}

(a. *Experimental Center of Desert Forestry* / b. *Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem* / c. *Institute of Desertification, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*)

Abstract: β diversity reflects the heterogeneity of species composition in communities, and is a hot topic in ecological research. In this study, we investigated plant communities from 46 sites in Ulan Buh Desert and used Sørensen heterogeneity index to measure β diversity patterns. Principal component analysis (PCA), Mantel and Partial Mantel tests were used to evaluate the effects of different environmental factors (including climate and soil) and community spatial distance on β diversity. The results showed that species composition differed greatly between ulan Bu and desert plant communities, and species turnover dominated the β diversity. Climate, soil and spatial distance had significant effects on β diversity and its turnover components, and the response of species turnover to β diversity was consistent with β diversity. The spatial alternation of plant species in Ulan Buh Desert is the result of the combined effects of environmental and dispersal limits, but the effects of environmental filtration on β diversity and composition exceed dispersal limits.

Key words: β diversity; environmental filtration; diffusion restriction; turnover; nested; Ulan Buh Desert