

多尺度上的多物种多格局 ——以莫索湾沙漠四种灌木及其生境为例

谢江波, 刘 彤*, 崔运河, 张元杭

(石河子大学生命科学学院, 石河子 832000)

摘要:植物的生长固然与自身特性有关,也与其生境中环境要素及其它物种相互作用相互影响,牵涉到生物格局、环境格局和景观格局的相互作用,已有研究表明,这种作用具有多尺度特性。量化这 3 种格局的某些重要特征,将有利于理解这种尺度行为对格局的影响,甚至量化格局在多尺度上的一些特性。在古尔班通古特沙漠南缘莫索湾沙地选取相隔 15km 的两个 200m × 200m 样地,以心叶驼绒藜(*Ceratoides ewersmanniana*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、琵琶柴(*Perosimonia soongorica*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)及其生境地形和土壤理化性质为研究对象,联合小波分析(WAA)、点格局分析(PPA)和典范对应分析(CCA)研究莫索湾沙漠 4 种灌木种内的聚集性(成丛性)及其周期性、种间相互作用、边缘效应及其与生境地形和土壤理化性质的关系,发现表观上沙生植物分布非连续,但是可形成 25 ~ 80m 尺度范围的成丛性分布,且周期性出现,心叶驼绒藜周期为 115 ~ 125m、梭梭周期为 130 ~ 140m,研究表明,周期为 110m 的地形基频是植物成丛性周期形成的主因。琵琶柴和沙拐枣虽成丛分布,但未发现其周期,其周期可能在更大的幅度上存在;其次,东西方向的边缘量化检测结果表明:东西方向也存在功能边缘和结构边缘,不像南北边缘的位置是受到太阳辐射和遮阴作用影响,东西边缘的位置却是受到了垄状沙丘大小和地形的影响;再次,种间关系研究发现:4 种灌木相互都是负相关,且在大多数尺度上是显著负相关。结果表明:荒漠植物通过成丛或聚集分布可以形成适合本物种生存的局部微生境。

关键词:成丛性; 周期性; 边缘效应; 小波分析; 点格局分析

文章编号:1000-0933(2008)05-2176-15 中图分类号:Q142, Q16, Q948 文献标识码:A

Multispecies, multi-patterns at multiple scales: a case study of four shrubs at Mosuowan Desert, China

XIE Jiang-Bo, LIU Tong*, CUI Yun-He, ZHANG Yuan-Hang

College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2176 ~ 2190.

Abstract: We investigated the distributions and habitats of *Ceratoides ewersmanniana*, *Haloxylon ammodendron*, *Rerosimonia soongorica* and *Calligonum mongolicum* in two plots (200m × 200m, the distance between the plots is 15 km) at Mosuowan desert. We analyzed their intraspecific clumpiness (caespitose) and periodicity, interspecific interaction, edge effect, and their relationship with habitats' geomorphology and soil physical and chemical properties. Wavelet analysis

基金项目:国家教育部春晖计划资助项目(Z2006-1-83014); 新疆自治区高校科研优秀青年学者奖励计划资助项目(XJEDU2005E09)

收稿日期:2007-09-12; **修订日期:**2008-01-15

作者简介:谢江波(1982 ~),男,湖南人,硕士生,主要从事植物生态学研究. E-mail:0208xiejiangbo@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liutong1968@yahoo.com.cn

致谢:美国加州大学河滨分校(University of California at Riverside)植物系数学与理论生态学李百炼教授对本文的写作、分析过程和结论都提出了修改意见,特此致谢

Foundation item: The project was financially supported by Chunhui Projects of State Education Ministry of China (No. Z2006-1-83014) and Excellent youth scholar program in Xinjiang Autonomous Region (No. XJEDU2005E09)

Received date:2007-09-12; **Accepted date:**2008-01-15

Biography: XIE Jiang-Bo, Master candidate, mainly engaged in plant ecology. E-mail:0208xiejiangbo@163.com

was used to detect edges from east to west, explain its existence, and quantify its location; Furthermore, we combined Wavelet Analysis and Point Pattern Analysis to detect and quantify the scales and periods of clumpiness. Finally, using Wavelet Analysis, Point Pattern Analysis and Canonical Correspondence Analysis, we studied the importance of habitats' geomorphology and soil physical or chemical properties to biological patterns. We got some important findings: First of all, the distributions of *C. ewersmanniana* and *H. ammodendron* were non-continuous, rather showing aggregated and periodic distribution patterns (115 – 125m for *C. ewersmanniana*, and 130 – 140m for *H. ammodendron*), which were caused by the geomorphologic oscillation period at 110m. *P. soongorica* and *C. mongolicum* showed aggregated distribution patterns but no period; Second, detected edge effect demonstrated that the east-west edges corresponding to the influences of their geomorphology, in the contrary, the south-north edges corresponded to the influences of incoming solar radiation, shade effect and surface characteristics; Third, the result of interspecific interactions indicated that aggregation of desert plants was correlated with habitat conditions. Desert plants could form a micro-habitat by aggregation to reduce evapotranspiration stress and serve as an important adaptive strategy at the community level.

Key Words: caespitose; periodicity; edge effect; wavelet analysis; point pattern analysis

生态系统的格局研究包括生物格局、环境格局、景观格局。虽然植物的生长与自身特性有关,但也与其生境中环境要素及其它物种相互作用相互影响,牵涉到生物格局、环境格局和景观格局的相互作用,已有研究表明,这种作用具有多尺度特性。量化这 3 种格局的某些重要特征,将有利于理解这种尺度行为对格局的影响,甚至量化格局在多尺度上的一些特性。

生物格局 “种群”指在一个特定的时间里,占据一定空间的同一个物种的有机体的集合^[1~3]。不同生物类群的分布格局,如乔木、灌木及草本植物等的分布,都会影响到系统的生物及非生物过程^[4],种群分布格局是系统水平格局研究的经典内容,但是单个种的格局可能由多空间和当前尺度下与环境种其他种相互的生态作用决定的,为了更好的理解种间相互作用和群落动态,多尺度多物种的格局研究是必要的^[5]。点格局分析(PPA)^[2,3,6]和小波分析(WAA)^[4,7~12]是研究植物多尺度格局的重要方法,PPA 侧重研究种内或种间的聚集性(成丛性)或多尺度相关性,但消除了边缘效应^[2,3,6],WAA 则需要大尺度大样本数据,侧重于各尺度数据的挖掘以及边缘检测,注重每一尺度每一空间位点的格局细节^[4,13]。边缘效应是景观格局研究的重点之一。

环境格局 系统水平上微生境的格局^[7],近年来也受到关注,特别是微地形、林隙、边缘效应^[4,13]等研究的深入,使生态系统中微生境的差异及格局方面的研究向较微观方向发展,事实上,生态系统内部微环境的差异对系统生态过程的影响是不容忽视的^[4,7]。已经证明许多物种的形态或生命特征与它们的生境特点之间表现出很强的关联性^[14]。WAA 已经被用来探究多尺度和沿样带微环境的景观结构^[4,7]、土壤异质性^[8]、太阳活动^[9]、林下冠层植物的多样性^[10]、植物生产力^[11]、林窗分布规律^[12]等;同时,典范对应分析(CCA)能够合理、有效地解释植物种和植物群落的空间分布与环境因子之间的关系^[15]。

景观格局 景观生态学中的异质性、斑块、廊道、破碎化、边缘等概念,都与生物格局密切相关。斑块大小对生物多样性的影响是源自环境异质性和多样性。斑块形状同样重要,斑块形状的重要生态学特征是景观边界的边缘效应,它通过影响斑块间的物质和能量交换而影响斑块内的物种多样性^[16~21]。将 WAA 用于边缘检测,将允许比较结构边缘(structural edge)的位置(如树的位置)和功能边缘(functional edge)(感兴趣的变量在森林-裸地边缘之间转换的位置),在适当的尺度上耦合格局与功能。WAA 非常适合于研究跨边缘的空间格局,它不要求数据正交和平稳^[4]。

本文以古尔班通古特沙漠南缘莫索湾沙地选取相隔 15km 的两个 200m × 200m 样地,以心叶驼绒藜(*C. ewersmanniana*)、梭梭(*H. ammodendron*)、琵琶柴(*P. soongorica*)和沙拐枣(*C. mongolicum*)及其生境地形和土壤理化性质为研究对象,联合小波分析(WAA)、点格局分析(PPA)和典范对应分析(CCA)来研究莫索湾 4 种沙生灌木种内的聚集性(成丛性)及其周期、种间相互作用、边缘效应及其与生境地形和土壤理化性质的关

系,做了4个方面工作:(1)特定植物群落中各种植物成丛性的发育程度在生境条件方面主要受蒸腾失水胁迫与土壤供水能力制约,合适的丛径大小和聚集程度有利于荒漠植物对于旱环境的适应^[3],通过WAA和PPA在较大样地内检测了合适的聚集尺度或丛径的大小,量化植物丛与微地形之间的关系,发现植物丛分布具有与地形相关的周期性。(2)Redding等量化了南北边缘的存在位置主要受到了太阳辐射和遮荫作用的影响^[4],而东西方向由于受太阳辐射相当,并且没有遮荫作用的影响,其是否存在边缘并没有研究。在本研究中,用WAA沿东西方向进行边缘检测,证实了东西边缘的存在并量化其位置。(3)用CCA研究了植被数量在微地形、土壤理化性质下的分布规律。(4)比较了PPA和WAA两种多尺度研究方法在格局研究上的优劣。

1 研究对象与方法

1.1 研究区概况

本研究地点为莫索湾南缘沙漠,是中国第二大沙漠——古尔班通古特沙漠南向延伸的一个支脉,位于天山垂直带与沙漠交界过渡带,它南对天山,与石河子地区、沙湾和玛纳斯县农田和城镇居集地相邻,是屯垦于古尔班通古特沙漠腹地新疆生产建设兵团148、149和150团出入的咽喉,地理位置极为重要。全年降雨小120 mm,平均积雪深度17 cm,年蒸发量为1942.1 mm。全年日照2777 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温为3594 $^{\circ}\text{C}$,春夏季为风季,最大风速20 m/s,地下水13 m左右。该地区沙漠四周设有铁丝围栏,植被受人畜破坏较轻,发育良好。以藜科的心叶驼绒藜(*C. ewersmanniana*)、梭梭(*H. ammodendron*)、以及柽柳科的琵琶柴(*P. soongorica*)等物种为优势分布。

1.2 取样设计

在野外实地考察的基础上,于2005年9月下旬在靠近绿洲到沙漠腹地的15 km范围内取两个样地,样地A(86°09'29"E, 44°44'09"N)和样地B(86°05'40"E, 44°47'14"N)。在每一样点沿南北方向(与沙漠走向相同)设置200 m × 200 m的样地,以保证取样的代表性和有效性^[22,23],以5 m × 5 m的小样方调查记录每一样方内的心叶驼绒藜、梭梭、琵琶柴、沙拐枣的株数和坐标及地形情况(包括垄顶、垄间地、垄坡),样地A中地形(图1a)、灰梭梭(图1b)和心叶驼绒藜数量(图1c)以及样地B中地形(图1d)、灰梭梭(图1e)和心叶驼绒藜数量(图1f)均以灰度图像给出;在每个样地内设置18个样方(先选定代表地形,东、南、西、北方向的垄坡各3个,垄顶3个,垄间地3个,在各种地形区域中随机选取样方),共取36个样方(每个样方分四层取土壤(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm,每层次选3个不同部位用环刀取土样,以混合土样测定土壤的各项理化指标),并对取土样方进行编号。土壤密封带回实验室进行土壤理化性质分析,包括:质量含水量%(烘干法)、pH值、速效磷含量(mg/kg)(0.5 mol/L的碳酸氢钠法)、含氮量(g/kg)(半微量开氏法)、有机质(g/kg)(重铬酸钾容量法)。

1.3 分析方法

1.3.1 点格局分析(图2,图3)(PPA)

种内关系公式:

$$\dot{K}(t) = \left(\frac{A}{n^2}\right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{W_{ij}} I_t(u_{ij}) \quad (1)$$

式中, A 表示样地面积; n 表示物种个体总数; u_{ij} 表示第 j 株植物和第 i 株之间的距离, t 表示空间尺度,当 $u_{ij} \leq t$ 时, $I_t(u_{ij}) = 1$;反之, $I_t(u_{ij}) = 0$ 。 W_{ij} 为以点 i 为圆心、以 u_{ij} 为半径的圆落在面积 A 中的弧长与整个圆周的比值,可校正边界效应引起的误差。

种间关系公式:

$$\check{V}(t) = \left(\frac{A}{n_p n_q}\right) \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_q} \frac{1}{W_{ij}} I_t(u_{ij}) (i \neq j) \quad (2)$$

式中, n_p 和 n_q 分别表示不同物种 p 和 q 的数量; i 代表 p 物种的第 i 株, j 代表 q 物种的第 j 株; W_{ij} 、 (u_{ij}) 和 A 的含义与(1)式相同。

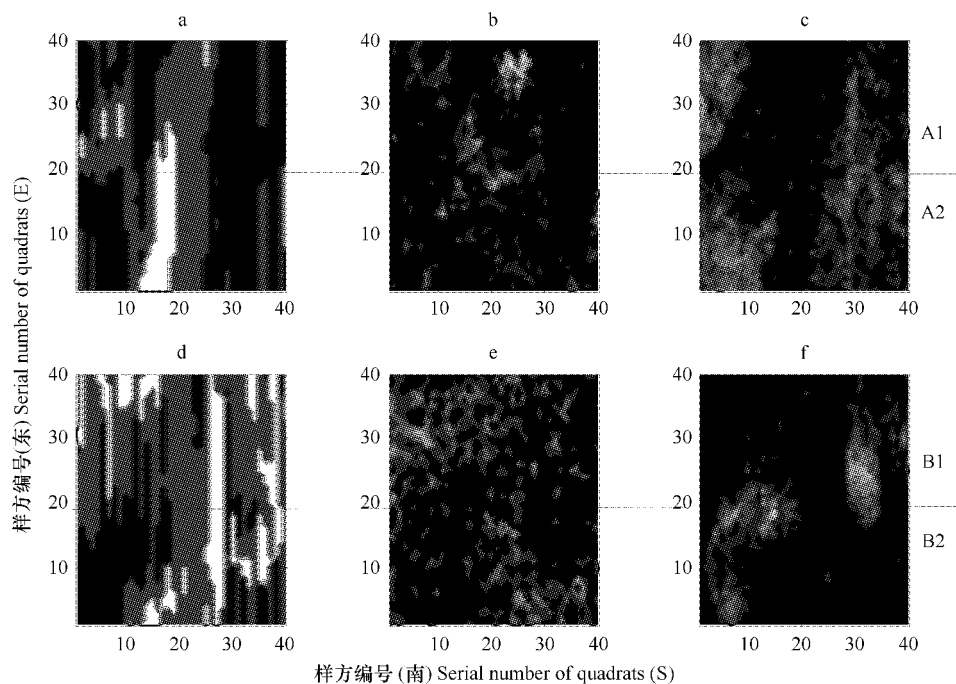


图1 地形灰度及心叶驼绒藜、梭梭数量灰度图像

Fig. 1 Gray image of landform and the number of *C. ewersmanniana* and *H. ammodendron*

(a) A 样地地形; (b) A 样地梭梭; (c) A 样地心叶驼绒藜; (d) B 样地地形; (e) B 样地梭梭; (f) B 样地心叶驼绒藜。样地 A 被重新合并并且沿东西方向等分为 A1 和 A2 样地。样地 B 也进行了同样的过程(被命名为 B、B1、B2)。梭梭分布在垄坡(图中灰色部分)和垄顶(图中白色部分),在垅间地(图中黑色部分)分布较少。但是心叶驼绒藜分布在垄顶和垄坡,在垄顶分布较少。在样地 B 中,1stE 单元到 20thE 单元和 30thS 单元到 40thS 单元所包围的白色区域受到人类活动干扰 (a) Landform of plot A; (b) *H. ammodendron* of plot A; (c) *C. ewersmanniana* of plot A; (d) Landform of plot B; (e) *H. ammodendron* of plot B; (f) *C. ewersmanniana* of plot B. Then plot A was re-combined as A and halved into A1 and A2 (named as A, A1, A2); The same procedures were executed to plot B (named as B, B1 and B2, respectively); *H. ammodendron* (b, e) were distributed in slope (gray) and top (white), but rarely distributed in interdune (black), but *C. ewersmanniana* (c, f) were distributed in interdune (black), rarely in slope (gray), and no distribution in top (white); In plot B, the white area in 1stE to 20thE unit and 30thS to 40thS unit was disturbed by human activities

1.3.2 小波分析(WAA)

若 $f(t)$ 是一个可测的,平方可积的函数,即具有有限的能量, $f(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 为 $f(t)$ 的矢量空间, R 为实数集。则连续小波变换定义为信号 $f(t)$ 的小波基函数内积:

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(\bar{t}) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

$$a > 0, f(t) \in L^2(R) \quad (3)$$

经过小波变换后, $f(t)$ 展开为小波级数,即:

$$f(t) = \sum_{j,k \in \mathbb{Z}} d_{i,j} \psi_{i,j} \quad (4)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为方便用 $d_{i,j}$ 来表示,这样 $f(t)$ 就被表示成了各种分辨率小波的线性组合,其中 $d_{i,j}$ 就是对应于小波函数 $\psi_{i,j}$ 的小波系数(图 4, 图 5)。

小波方差(图 6a, c, e, 图 7a, c, e)^[24]:

$$V(a) = \frac{\sum_{i=1}^n W^2(a, b_i)}{n} \quad (5)$$

表示所有位置的数据在给定尺度的小波分解下小波系数离开平均位置的量度,用来检验全局结构(global structure)^[25]。与尺度对应的一个小波方差峰值是数据优势结构的一个估计^[26,27]。

位置方差(图 6b,d,f,图 7b,d,f)^[24]:

$$P(b) = \frac{\sum_{i=1}^m W^2(a_i, b)}{m} \quad (6)$$

一个位置 b (时间或空间位置) 尺度 a (从 1 到 m) 下小波系数平方的均值。快速出现的位置方差波峰表明数据变化剧烈,将每个位置方差波峰与原始数据比较,将决定波峰是否是边缘的改变位置还是数据的固有变异。位置方差的波峰被分为单个的优势波峰(清楚的空间非线性)和多波峰(不清楚的空间非线性)^[4]。

尺度因子 (3) 式中积分核:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (7)$$

是引进的窗口函数,或称小波或基函数(wavelets or basic functions),实际是一组函数系列 $\{\psi_{a,b}(t)\}$,它是由小波母函数或小波 $\psi(t)$ 进行伸缩和平移而形成的,由于两个参数可以连续改变,故称(3)式为连续小波变换。

1.3.3 典范对应分析(CCA)

这类方法广泛用于植被生态学研究,能够合理、有效地解释植物种和植物群落的空间分布与环境因子之间的关系^[28~30],通常用于景观分析的土地覆盖数据即已是对地表特征的一种划分,然而这种分类仅是基于地表土地覆盖特征或是地表反射率进行的,并不能直接揭示出各种类型之间以及各类型与环境因子的内在联系,而植被分类方法却可以揭示出其生态关系。植被排序是从植被梯度分析发展而来的,能使排序轴反映一定的生态梯度,解释研究对象分布与环境因子间的关系^[15]。

1.4 数据预处理

WAA 分析需要波动数据,所以采样所得样方数据需要进行数据转换,其步骤依次是:(1)垄状沙丘(包括垄顶、垄间地、垄坡)赋值,其过程请参见本文作者文献^[31];(2)根据赋值做出地形灰度图像,根据植被数量分布做出灰度图像(图 1);(3)合并样方为 A、A1、A2、B、B1、B2,合并过程请参见本文作者文献^[31](图 1);(4)合并后的样地地形灰度值、植被数量矩阵数据标准化;(5)标准化数据作为波动数据用于小波分析;(6)进行 WAA:基于野外数据采样的复杂性,本研究采用一维连续 WAA,以墨西哥帽子小波函数为母函数。

本文中 WAA 的数据是 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 样方内的植物株数,所以 scale $a = 1$ 实际距离为 5m,这样仍为连续样方,符合连续 WAA 的要求;同时样方编号 $\times 5\text{m}$ = 实际距离。

CCA 分析数据:对应取土地点的植被数量数据用其周围 5 个样方数据的平均值。

除 CCA 在 R 软件的 vegan 包中完成外,其他数据分析都在 Matlab 6.5 中编程完成。

2 数据分析和结论

琵琶柴和沙拐枣在样地中密度都很小(表 1),不适合于 WAA,所以,本文小波分析只针对心叶驼绒藜、梭梭和地形;PPA 对密度没有限制,4 种灌木都可以进行分析。

2.1 PPA 分析结果

A 样地中,心叶驼绒藜在 1~80m 上聚集分布,在很小的尺度范围有随机分布,随后出现种内负相关关系(图 2a);梭梭在尺度 1~100m 上聚集分布(图 2b);沙拐枣在 1~60m 上聚集分布,在 60~70m 上随机分布,70m 以后出现种内负相关关系(图 2c);琵琶

表 1 A 和 B 样地 4 物种的总株数
Table 1 Total number of 4 species in plot A and B

样地 Plot	物种 Species	株数 Total number of plants
A	心叶驼绒藜 <i>C. ewersmanniana</i>	3552
	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	805
	琵琶柴 <i>R. soongorica</i>	448
	沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>	19
B	心叶驼绒藜 <i>C. ewersmanniana</i>	1282
	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	1304
	琵琶柴 <i>R. soongorica</i>	43
	沙拐枣 <i>C. mongolicum</i>	22

柴从 1~85m 是聚集分布,随后在很小的尺度范围里有随机分布,之后出现种内负相关关系(图 2d);梭梭与心叶驼绒藜在 1~5m 上正相关,在 6~37m 上显著负相关,这一结果与小波系数的相关关系吻合,随后一个小尺度范围内非显著负相关,在 40~65m 上正相关,随后显著负相关(图 2e);心叶驼绒藜与沙拐枣、心叶驼绒藜与琵琶柴、梭梭与沙拐枣、梭梭与琵琶柴在 1~100m 上都出现负相关关系且显著(图 2f,g,h,i);沙拐枣与琵琶柴在 1~25m 上显著负相关,25m 进入包迹线,负相关不明显(图 2j)。

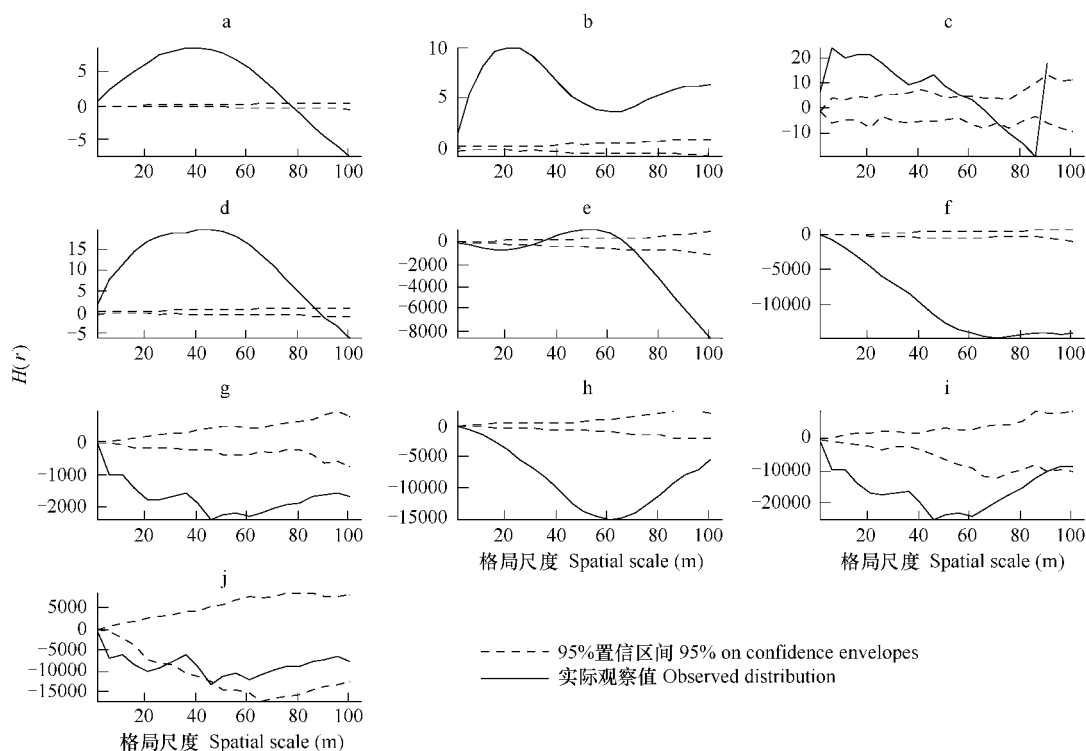


图 2 A 样地点格局分析

Fig. 2 Point patterns analyses for plot A

(a) 心叶驼绒藜 *C. ewersmanniana*; (b) 梭梭 *H. ammodendron*; (c) 沙拐枣 *C. mongolicum*; (d) 琵琶柴 *R. soongorica*; (e) 心叶驼绒藜和梭梭 *C. ewersmanniana* & *H. ammodendron*; (f) 心叶驼绒藜和沙拐枣 *C. ewersmanniana* & *C. mongolicum*; (g) 心叶驼绒藜和琵琶柴 *C. ewersmanniana* & *R. soongorica*; (h) 梭梭和沙拐枣 *H. ammodendron* & *C. mongolicum*; (i) 梭梭和琵琶柴 *H. ammodendron* & *R. soongorica*; (j) 沙拐枣和琵琶柴 *C. mongolicum* & *R. soongorica*

B 样地中,心叶驼绒藜在 1~90m 上聚集分布,随后随机分布(图 3a);梭梭在 1~93m 聚集分布,随后随机分布(图 3b);沙拐枣在 1~20m 上聚集分布,到尺度 70m 是随机分布(图 3c);琵琶柴在 1~70m 上聚集分布,随后随机分布(图 3d);心叶驼绒藜与梭梭的上下包迹线分别是正无穷和负无穷,但是其值均小于 0,因此是负相关关系(图 3e),与 WAA 结果相比,有较大差别;心叶驼绒藜与沙拐枣在 1~50m 上负相关,且负相关显著,从 50m 以后不显著(图 3f);心叶驼绒藜与琵琶柴在 1~60m 上显著负相关,60m 以后不显著(图 3g);梭梭与沙拐枣在 1~40m 上显著负相关,40m 以后不显著(图 3h);梭梭与琵琶柴在 1~85m 上显著负相关,85m 以后不显著(图 3i);沙拐枣与琵琶柴的负相关关系在各尺度上均不显著(图 3j)。

结果表明:4 种优势灌木在一定尺度范围内都有丛性分布,其合适的丛径可用聚集尺度计算,分别为 80~90m(心叶驼绒藜)、90~100m(梭梭)、20~40m(沙拐枣)、60~70m(琵琶柴);种间关系分析发现他们之间都存在显著空间负相关。结果表明:优势植物虽然通过成丛分布来适应环境胁迫,但是各优势植物却是各自独立成丛,并且丛径大小保持在合适的尺度范围内,以实现资源的最优竞争竞争。

2.2 小波分析结果

由小波分析产生的小波系数(图 4,图 5)的大小表征了原始数据与小波母函数的相似程度,一个大的小

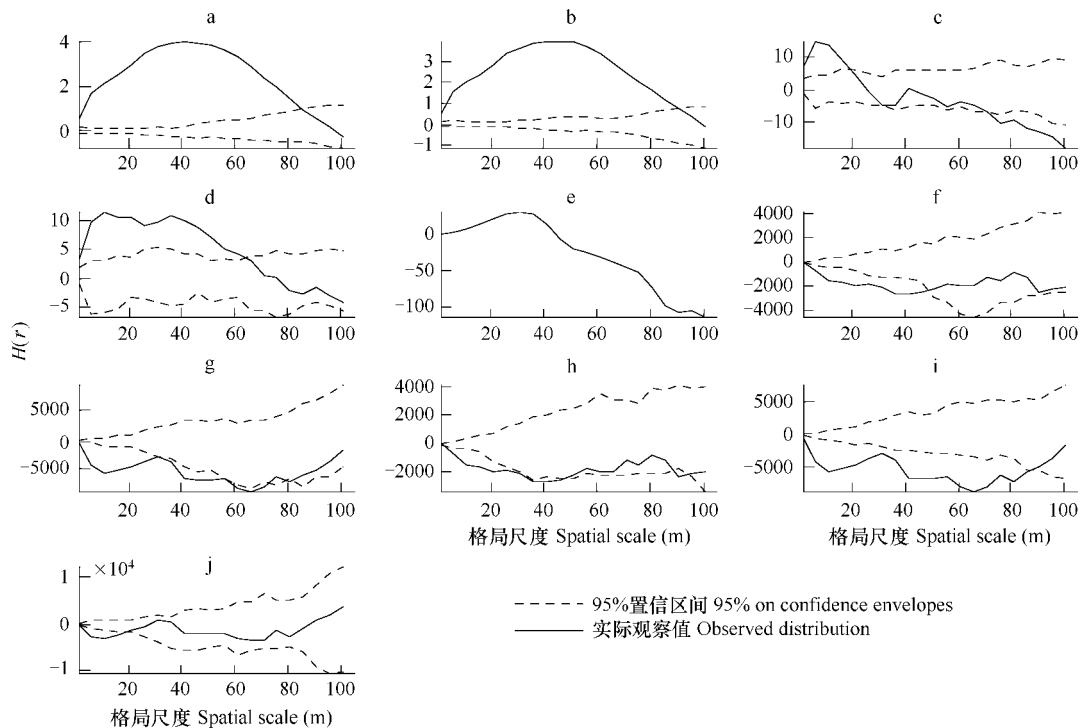


图3 B样地点格局分析

Fig.3 Point patterns analyses for plot B

(a) 心叶驼绒藜 *C. ewersmanniana*; (b) 梭梭 *H. ammodendron*; (c) 沙拐枣 *C. mongolicum*; (d) 琵琶柴 *R. soongorica*; (e) 心叶驼绒藜和梭梭 *C. ewersmanniana* & *H. ammodendron*; (f) 心叶驼绒藜和沙拐枣 *C. ewersmanniana* & *C. mongolicum*; (g) 心叶驼绒藜和琵琶柴 *C. ewersmanniana* & *R. soongorica*; (h) 梭梭和沙拐枣 *H. ammodendron* & *C. mongolicum*; (i) 梭梭和琵琶柴 *H. ammodendron* & *R. soongorica*; (j) 沙拐枣和琵琶柴 *C. mongolicum* & *R. soongorica*

波系数表示在相应的位置,原始数据出现了对整个数据格局有特殊贡献的“特殊结构”,这种“特殊结构”提供了数据格局形成的潜在原因等信息,甚至出现了相对有规律的周期性现象^[13]。以往的研究表明,当空间变量是纵向沙丘地形值时,小波系数的“特殊结构”所在位置是丘间地或沙丘顶部所在的位置中心。同时,将位置与实际的地形比对发现,波峰所在位置为丘顶,波谷所在位置为丘间地;当空间变量是植物数量时,小波系数的“特殊结构”所在的位置是植物数量集中或没有植物分布的地带。将位置与实际植被分布比对发现,波峰代表数量集中的位置,波谷代表没有植物分布^[31]。因此,沙丘出现的周期和植被数量动态变化的周期可以用两个小波系数波峰或波谷之间的距离表示。

在样地 A, A1, A2 和样地 B, B1, B2 中, WAA 的各个尺度小波系数图像表示了各尺度上植物与地形的格局,总的来说,在小尺度上剧烈变化的格局,在大尺度上逐渐成丛性分布,波动趋于平缓,并最终形成周期性的分布。小波方差图像显示,尺度 5(25m)或 6(30m)是最佳的分析尺度(图 6a, b, c, 图 7a, b, c)。最佳分析尺度下,沙丘分布呈现周期性,其地形基频为 110m 左右,心叶驼绒藜数量动态周期为 115 ~ 125m,梭梭数量动态周期为 130 ~ 140m(相邻两个波峰或波谷之间的距离表示一个周期,图 4f, m, n, u, v; 图 5, f, m, n, u, v),两物种与地形在尺度 5(25m)以上的小波系数显著相关(表 3, 表 4)。既两物种成丛分布,且两个成丛的间隔距离具有与地形基频相关的周期性。

位置方差图像表明,快速出现的位置方差波峰表明数据变化剧烈,将每个位置方差波峰与原始数据比较,将决定波峰是否是边缘的改变位置还是数据的固有变异。位置方差的波峰被分为单个的优势波峰(清楚的空间非线性,表 2)和多波峰(不清楚的空间非线性,表 2)。本研究中样地 A, A1, A2 由东到西有 3 个结构边缘位置和 6 个功能边缘位置(心叶驼绒藜和梭梭各 3 个)(图 6b, d, f),样地 B, B1, B2 由东到西有 3 个结构边

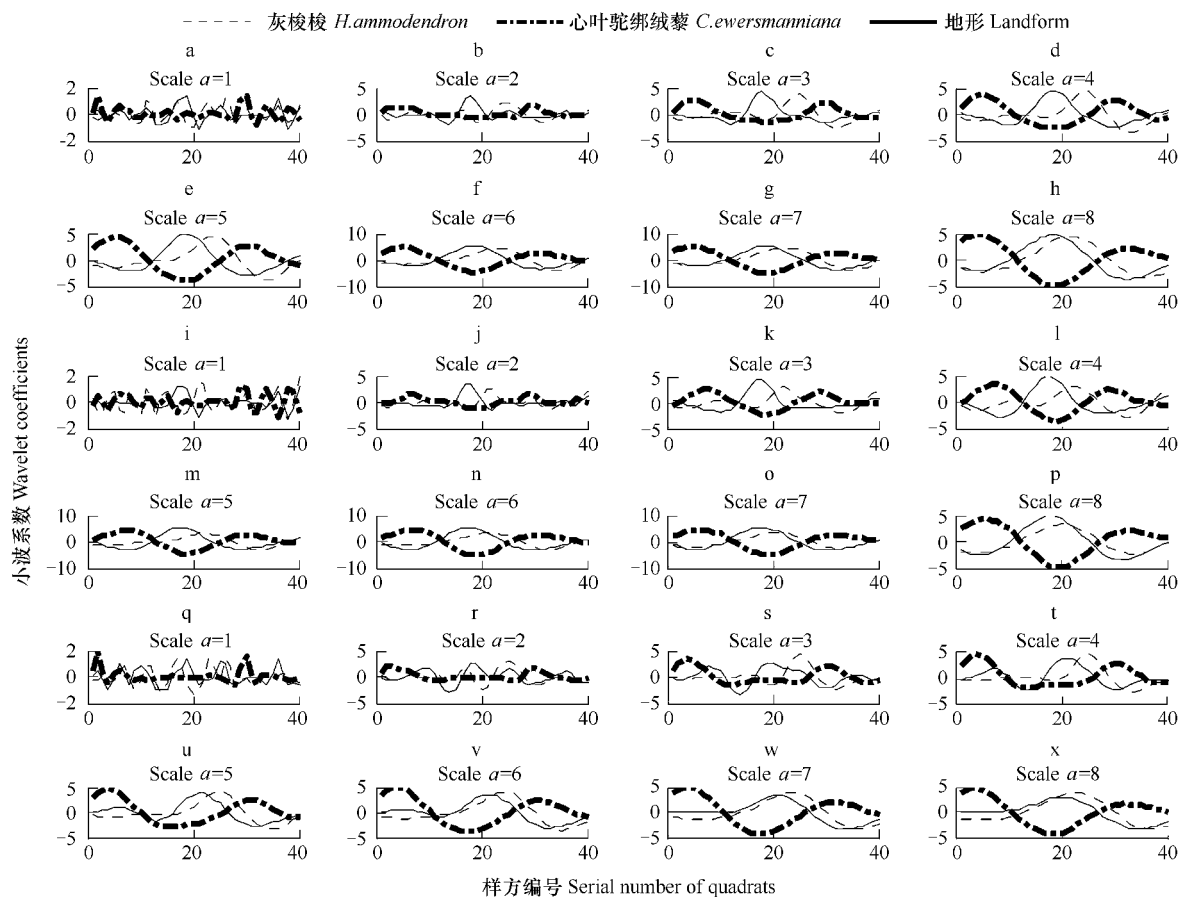


图4 小波变换系数(由墨西哥帽子小波变换产生)

Fig. 4 Coefficients of the wavelet transform (produced with the Mexican hat wavelet function)

(a~h)样地 A; (i~p)样地 A1; (q~x)样地 A2; 在小波分析尺度6或大于6时,地形的小波系数在22nd单元处出现波峰,在8th和30th单元处出现波谷,波长为110m ((30-8)×5m); 心叶驼绒藜的小波系数在22nd单元出现波谷,在12nd和37th单元处出现波峰,波长为125m; 梭梭的小波系数在4th和22nd单元处出现波谷,在12nd出现波峰,波长140m; 在A1、A2中,结论与A相同

(a~h) plot A; and (i~p) plot A1; and (q~x) plot A2. In dominant scale $a=6$, specific features of the landform indicated by peak at 22nd unit and two valleys at 8th, 30th unit, and wavelength was 110m((30-8)×5m); f); The specific features of *C. ewersmanniana* indicated by one valley at 22nd unit and two peaks at 12nd, 37th unit, and wavelength was 125m (f); The specific features of *H. ammodendron* indicated by two valleys at 4th, 22nd unit and one peak at 12nd unit, and wavelength was 140m(f); In plots A1 and A2, the conclusion was the same as plot A (n,v)

缘位置和6个功能边缘位置(心叶驼绒藜和梭梭各3个)且交错分布(图7b,d,f),样地内的结构边缘和功能边缘之间的间隔具有以下特点:所有样地心叶驼绒藜分布的边缘位置到最近结构边缘位置的距离大于梭梭分布边缘位置到最近结构边缘的距离,地形的边缘对应的植物分布密度大,既东西的边缘位置有利于植物幼苗的生长,不同样地之间的交错距离存在差别(表2,图6b,d,f;图7b,d,f)。

表2 心叶驼绒藜、梭梭数量和地形灰度 WAA 结果

Table 2 Results of wavelet analysis for the number of variables

	样方编号位置(由东到西) No. of plot(along east to west)																	
	Plot A			Plot A1			Plot A2			Plot B			Plot B1			Plot B2		
心叶驼绒藜 <i>C. ewersmanniana</i>	4	<u>19</u>	32	4	<u>19</u>	32	4	18	32	11	24	<u>36</u>	11	25	33	5	<u>22</u>	36
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	<u>6</u>	<u>20</u>	36	5	<u>18</u>	<u>35</u>	<u>6</u>	<u>20</u>	<u>36</u>	5	<u>23</u>	34	11	24	34	5	-	34
地形 Landform	15	21	31	15	21	<u>31</u>	15	21	31	7	24	<u>31</u>	<u>7</u>	24	31	<u>7</u>	24	<u>31</u>

离边缘最近的位置方差波峰位置值; 有下划线的值表示多波峰, 没有下划线的值是单波峰 Values are the location of the wavelet peak nearest each edge; Underlined values denote multiple peaks and non-underlined values are single dominant peaks

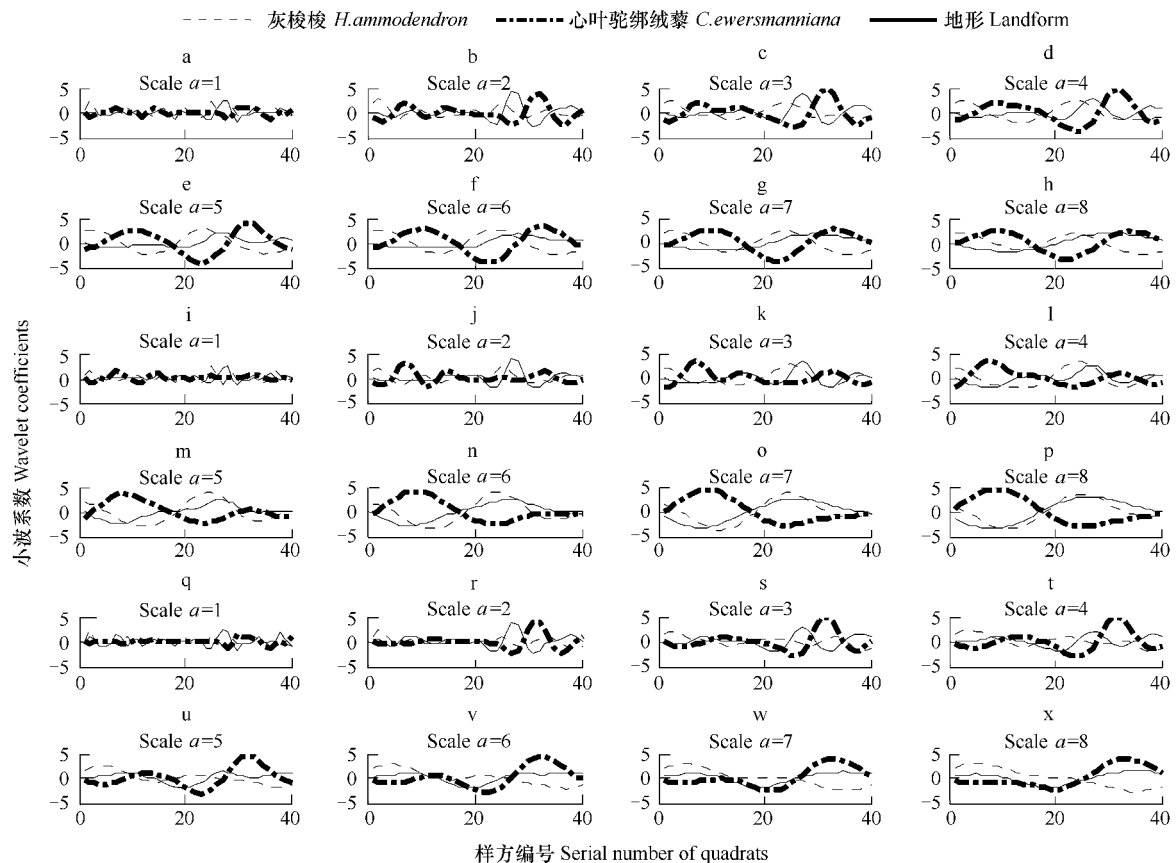


图5 小波变换系数(由墨西哥帽子小波变换产生)

Fig. 4 Coefficients of the wavelet transform (produced with the Mexican hat wavelet function)

(a~h)样地 B; (i~p)样地 B1; (q~x)样地 B2; 在小波分析尺度6或大于6时,地形的小波系数在16th单元处出现波峰,在8th和28th单元处出现波谷,波长为100m;心叶驼绒藜的小波系数在22nd单元出现波谷,在10th和33rd单元处出现波峰,波长为115m;梭梭的小波系数在12nd和38th单元处出现波峰,在20th出现波谷,波长130m;在B1、B2中,结论与B相同

(a~h) plot B; and (i~p) plot B1; and (q~x) plot B2. In dominant scale $a=6$, specific features of the landform indicated by peak at 16th unit and two valleys at 8th, 28th unit, and wavelength was 100m; The specific features of *C. ewersmanniana* indicated by one valley at 22nd unit and two peaks at 10th, 33rd unit, and wavelength was 115m (f); The specific features of *H. ammodendron* indicated by one valley at 20th unit and two peaks at 12nd, 38th unit, and wavelength was 130m(f); In plots B1 and B2, the conclusion was the same as plot A (n,v)

表3 不同分解尺度下,A、B两样地灰梭梭小波系数与心叶驼绒藜小波系数的相关分析

Table 3 Correlation analysis of wavelet coefficients of *H. ammodendron* and *C. ewersmanniana* in different scales of plots A and B

尺度 Scale	样地 Plot					
	A	A1	A2	B	B1	B2
1	0.260	0.129	0.100	0.074	-0.277	0.220
2	-0.103	-0.346 *	-0.007	0.296	0.012	0.141
3	-0.313 *	-0.629 **	-0.086	-0.132	0.218	-0.082
4	-0.599 **	-0.703 **	-0.429 **	-0.357 *	-0.348 *	-0.068
5	-0.795 **	-0.739 **	-0.742 **	-0.388 *	-0.245	0.152
6	-0.881 **	-0.767 **	-0.886 **	-0.377 *	-0.042	0.396 *
7	-0.914 **	-0.797 **	-0.934 **	-0.370 *	0.180	0.607 **
8	-0.932 **	-0.833 **	-0.951 **	-0.373 *	0.380 *	0.760 **

样地 A、A1、A2、B、B1、B2 各变量的小波系数图(图4,图5)以及小波系数相关分析(表3,表4,表5)表明从尺度1(5m)~8(40m),梭梭和心叶驼绒藜的小波系数大多出现负相关,随着尺度的增长,负相关越显著

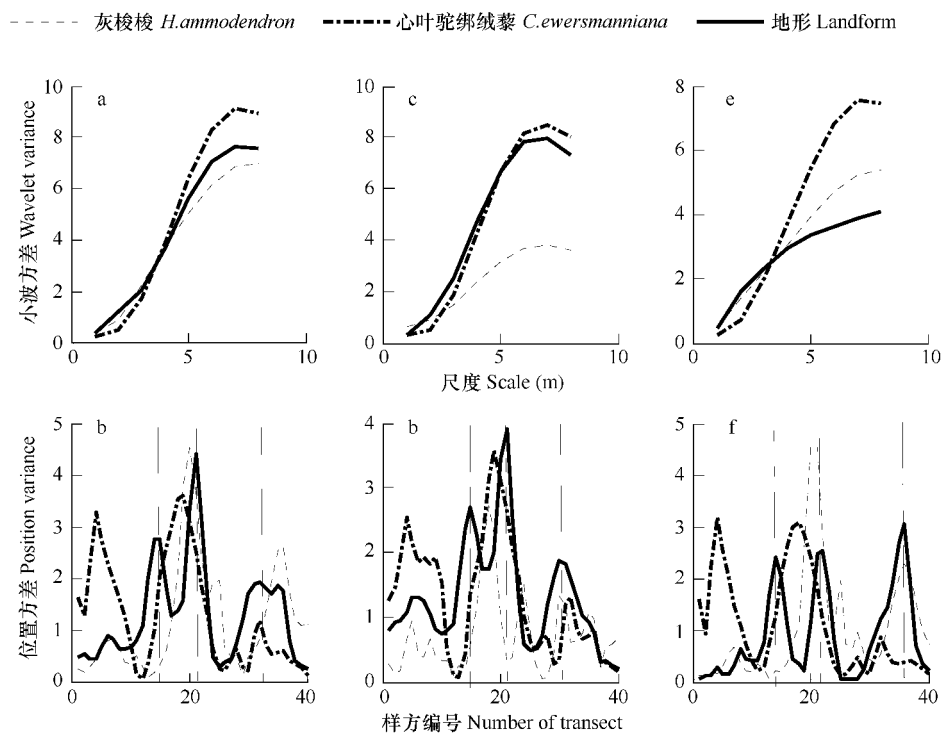


图 6 墨西哥帽子小波分析的小波方差与位置方差曲线图

Fig.6 Curve chart of wavelet variance and position variance of mexh wavelet analysis

垂直虚线表示地形交界的边缘 Vertical dashed lines denote the edges of landform;(a~b)A 样地 Plot A; (c~d)A1 样地 Plot A1; (e~f)A2 样地 Plot A2

(表 3);梭梭(或心叶驼绒藜)与地形的小波分析系数大多出现正相关(或负相关),随着尺度的增长,正相关(或负相关)越显著(表 4,表 5),在一定程度上说明植被的数量分布确实受地形变化的影响。随着分析尺度的增加,WAA 产生的数据成倍增长,虽然细节表现更详细,但是数据越多处理起来越困难。所以,在本研究中 WAA 不宜用来做大于 10(50m)以上尺度的分析,应与 PPA 联合起来使用。

表 4 不同分解尺度下,A、B 两样地灰梭梭小波系数与地形小波系数的相关分析

Table 4 Correlation analysis of wavelet coefficients of *H. ammodendron* and landform in different scales of plots A and B

尺度 Scale	样地 Plot					
	A	A1	A2	B	B1	B2
1	0.303	0.065	0.264	-0.158	-0.156	-0.020
2	0.052	-0.445 **	0.294	-0.066	0.204	-0.256
3	-0.036	-0.055	0.178	-0.111	0.387 *	-0.538 **
4	0.208	0.324	0.392 *	-0.026	0.490 **	-0.364 *
5	0.470 **	0.613 **	0.642 **	0.050	0.602 **	-0.143
6	0.648 **	0.791 **	0.774 **	0.055	0.705 **	-0.105
7	0.749 **	0.880 **	0.812 **	-0.014	0.792 **	-0.174
8	0.798 **	0.913 **	0.799 **	-0.157	0.857 **	-0.263

WAA 和 PPA 的分析结果表明:种内关系分析表明 4 种灌木在一些尺度上表现出了成丛分布(在微观尺度,可以用其是否聚集分布及呈聚集分布的尺度范围相对表示散生植物的成丛程度^[3])的现象。种间关系来说,4 种灌木在多数尺度上是一种负相关关系,且在有的尺度上显著。B 样地受人为干扰影响,其小波系数相关性分析结果与 PPA 结果出入较大,通过比较 B、B1、B2 样地的分析结果,发现干扰面积较小的 B1 样地与 B 样地结论接近(位置方差图接近,图 7b,d),而干扰面积大的 B2 样地与 B 样地差别大(位置方差图差别大,图

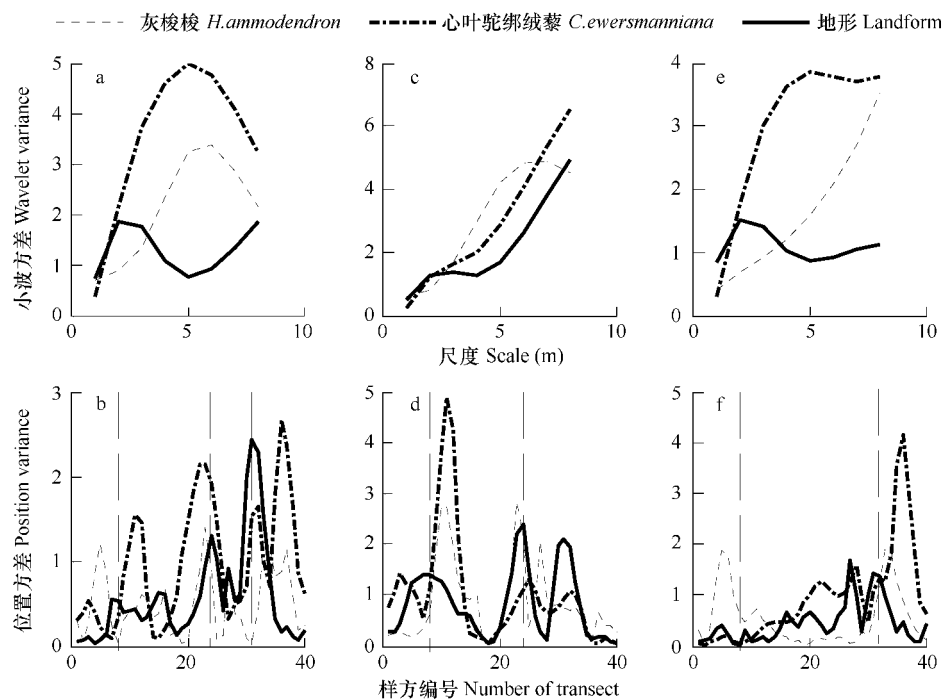


图7 墨西哥帽子小波分析的小波方差与位置方差曲线图

Fig.7 Curve chart of wavelet variance and position variance of mexh wavelet analysis

垂直虚线表示地形交界的边缘 Vertical dashed lines denote the edges of landform; (a~b) B 样地 Plot B; (c~d) B1 样地 Plot B1; (e~f) B2 样地 Plot B2

7d,f),这说明 WAA 比 PPA 更容易对于干扰敏感,这也是细节表现能力强的一个方面。

表5 不同分解尺度下,A,B 两样地心叶驼绒藜小波系数与地形小波系数的相关分析

Table 5 Correlation analysis of wavelet coefficients of *C. ewersmanniana* and landform in different scales of plots A and B

尺度 Scale	样地 Plot					
	A	A1	A2	B	B1	B2
1	-0.074	-0.308	0.160	-0.357 **	-0.003	-0.392 **
2	-0.298	-0.510	-0.199	-0.574 **	-0.163	-0.649 **
3	-0.527 **	-0.775 **	-0.134	-0.513 **	-0.418 **	-0.508 **
4	-0.761 **	-0.910 **	-0.137	-0.294 **	-0.698 **	-0.128
5	-0.873 **	-0.943 **	-0.259	-0.109	-0.855 **	0.296
6	-0.905 **	-0.934 **	-0.416 **	-0.069	-0.929 **	0.597 **
7	-0.899 **	-0.909 **	-0.546 **	-0.105	-0.966 **	0.746 **
8	-0.868 **	-0.874 **	-0.611 **	-0.138	-0.983 **	0.794 **

* 显著性水平为 $p < 0.05$ * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); ** 显著性水平为 $p < 0.01$ ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

2.3 典范对应分析结果

典范对应分析(图8)中,4种灌木可以分为3类:第1类沙拐枣和琵琶柴,其数量和20~60cm水分含量相关显著且生长在垄坡和垄间地;第2类梭梭,生长在垄顶和垄坡,其数量与20~60cm水分含量相关低;第3类心叶驼绒藜,生长在垄坡和垄间地,其数量与20~60cm水分含量相关低。本文中所测得的速效磷含量、pH值、有机质、含氮量均没有出现在二维CCA排序图中除了显示水分与植物数量具有相关关系外。

在排序图中,还可以得到:沙丘起伏影响了20~60cm水分在空间的配置,在垄坡和垄间地,20~60cm土

层含水量最丰富,沙丘顶部的含水量最少。

水分的初次分配受地形起伏影响。CCA 结果表明,20~60cm 水分在空间的分配是由地形起伏引起,而水分初次分配的结果使植物按其耐干旱胁迫力在沙丘的不同部位生长。

水分再分配受植物丛的影响。在植物丛下,土壤含水量很大,这是由于降水被植物丛截留,另外一部分是由根系从临近的裸地吸收水分,从而导致了水分的再分配^[32~34]。

地形通过水分分配间接影响了植物丛的分布,导致了植物成丛具有与地形相关的周期性分布。

3 讨论

(1) 表观上沙漠植被分布不连续,但在合适的尺度上具有成丛性的分布,且这种成丛性分布受其生境沙丘分布的影响而出现周期性分布的特点。张程等认为成丛分布可以形成一定的小生境,在某些方面显然也可拓展植物对环境的适应性。明显地,当散生植物成丛分布时,由于丛内风速较小,蒸腾失水的压力也相对较小,提高了干旱条件下的生存能力。无论是散生植物的“丛”还是丛生植物的“丛”,在更大尺度上可能再表现为聚集分布,故成丛性具有等级性^[3]。本文提出成丛周期性的概念,表示更大尺度上的聚集分布应为周期性分布。

(2) PPA 表明 4 个物种都有很强的种内正相关,既聚集性的分布(根据张程等人的观点,可以看作是成丛性的分布),其合适的丛径可用聚集尺度计算,分别为 80~90m(心叶驼绒藜)、90~100m(梭梭)、20~40m(沙拐枣)、60~70m(琵琶柴)。经 WAA 发现沙丘分布的地形基频 110m 左右,物种成丛性分布的周期分别为心叶驼绒藜数量动态周期 115~125m,梭梭数量动态周期 130~140m(图 4e,f,m,n,u,v,图 5e,f,m,n,u,v);梭梭和心叶驼绒藜呈负相关性,表观上,梭梭大部分生长在垄顶位置,而心叶驼绒藜大多生长在垄坡和垄间地(图 1),表明梭梭和心叶驼绒藜对水分要求迥异,CCA 的结果也与此吻合;其次,对沙拐枣、琵琶柴等物种而言,由于其空间聚集成度高,但是密度却很小,与密度大的心叶驼绒藜与梭梭各尺度上都是负相关,在 200m × 200m 范围内未发现其分布周期,其周期性可能在更大的尺度上存在。

(3) Redding 在研究“森林-砍伐地”边缘效应时,肯定南北方向存在结构边缘与功能边缘,其受太阳辐射、森林遮蔽作用以及土壤表层特性的影响,使水分与温度的功能边缘由南结构边缘进入砍伐区 8m 左右的距离,并且侵入北结构边缘 10m 远^[4]。同时,Redding 和 Hansen 等的研究中有表明:由于遮蔽效应的存在,造成了南边缘一侧土壤温度和阳光照射降低,“森林-砍伐地”的砍伐区南边缘幼苗生长将受到限制,相对来说,砍伐地其余地方幼苗生长较好。

而在本研究中,采取了与 Redding 研究中不同的方向——东西方向的边缘检测,由于东西面整天都可以接受来自太阳的辐射,其接受的太阳辐射也基本相当,不存在像南北方向那样的遮荫作用,与南北边缘的存在显著地受到太阳辐射影响不同,东西边缘的存在应是受到其他因素的影响。边缘检测结果发现东西方向同样存在功能边缘与结构边缘之间的交错现象(表 2),其交错距离(表 2)受样地微环境的地形和沙丘大小影响。

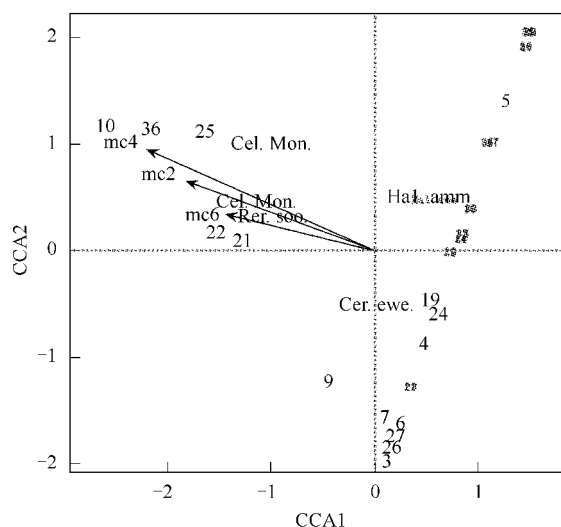


图 8 36 个样方的 CCA 二维排序图

Fig. 8 Two-dimensional CCA ordination diagram of 36 samples
mc2 代表 20~40cm 土层水分, mc4 代表 40~60cm 土层水分, mc6 代表 60~80cm 土层水分;丘顶编号:3、4、15、16、27、28;丘坡编号:5~12、17~24、29~36, 丘底编号:1、2、13、14、25、26
The eigenvalues for constrained axes are 0.384623 (CCA1), 0.239717 (CCA2), 0.001393 (CCA3); Tops: 3, 4, 15, 16, 27, 28; Slopes: 5~12, 17~24, 29~36; Interduns: 1, 2, 13, 14, 25, 26. Cer. ewe. for *C. ewersmanniana*, Hal. amm. for *H. ammodendron*, Rer. soon for *R. soongorica* and Cel. mon. for *C. mongolicum*. mc2 = soil gravimetric moisture content at 20~40cm, mc4 = soil gravimetric moisture content at 40~60cm, mc6 = soil gravimetric moisture content at 60~80cm

与南北边缘不同的是,东西边缘植被分布比其他位置更多,所以东西边缘的存在可能使幼苗更容易生长。

结论认为:在干旱区植被恢复过程中,应根据沙丘大小估计边缘的位置,综合考虑土壤供水能力、风速及空气干燥度等生态条件,按照合理的成丛大小和周期需求对植物进行合理丛植。

(4) 4 种灌木的种间关系都是负相关,且在大多数尺度上极显著,表明了沙生植物通过成丛分布形成了适合本物种生存的局部微环境,排斥其他物种生长,这与张程等人的结论相同^[3]。

(5) CCA 结果显示 0 ~ 60cm 水分是影响沙漠植被格局绝对主导地位的因素,降水分配、水分扩散和蒸腾主要受到沙丘分布的影响。一些结果也表明,在荒漠化地区的植被分布格局与降水的再分配及蒸腾强度存在密切联系^[35]。另外,水盐动态及其相互作用是影响该地区环境因子变化的主要因素^[36]。沙拐枣和琵琶柴对水分要求接近,但是 PPA 结果显示两种灌木负相关,表明两种灌木的丛聚性分布改变了丛聚地点土壤的微生境,形成了适合本物种生长的微生境。

(6) 在环境格局、景观格局、生物格局的关系中存在一个尺度行为。这个结果与以前的景观生物学研究^[37,38]结果相吻合,很好地与以下两个已经验证的假设吻合:i) 物种与环境特征统计极显著相关,但是可能不是在景观的所有地点;ii) 物种与环境特征统计极显著相关,但是可能不是在空间的所有尺度上^[14]。

(7) WAA 检测到合适尺度范围的下限,发现了与沙丘分布有关的植被成丛分布的周期性,检测边缘的存在并量化其位置,细节表现强,对于干扰敏感等;PPA 检测到合适尺度范围的上限,并量化各尺度上的种内和种间的相关性,验证了小波系数相关分析的结论。

References:

- [1] Greig Smith P. Quantitative Plant Ecology, 3rd edn. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 1983.
- [2] Yang H X, Zhang J T, Wu B, *et al.* Point pattern analysis of *Artemisia Ordosica* population in the Mu us Sandy Land. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4), 563—570.
- [3] Zhang C, Zhang M J, Xu C, *et al.* Analysis of Aggregation in desert plant species in sand lake, Ninxia Autonomous Region, China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1), 32—39.
- [4] Redding T E, Hope G D, Fortin M J, Schmidt M G, Bailey W G. Spatial patterns of soil temperature and moisture across subalpine forest clearcut edges in the southern interior of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 2003, 83, 121—130.
- [5] Chen X W, Li B L, Collins S L. Multiscale monitoring of a multispecies case study: two grass species at Seville. *Plant Ecology*, 2005, 179, 49—154.
- [6] Zhang J T. Analysis of spatial point pattern of plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4), 344—349.
- [7] Saunders S C, Chen J, Crow T R, Brososke K D. Hierarchical relationships between landscape structure and temperature in a managed forest landscape. *Landscape Ecology*, 1998, 13(6), 381—395.
- [8] Lark R M, Webster R. Analysis and elucidation of soil variation using wavelets. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(2):185—206.
- [9] Rigozo N R, Nordemann D J R, Zanandrea A, *et al.* Solar variability effects studied by tree ring data wavelet analysis. *Advances in Space Research*, 2002, 29(12):1985—1988.
- [10] Brososke K D, Chen J, Crow T R, Saunders S C. Vegetation responses to landscape structure at multiple scales across a Northern Wisconsin, USA, pine barrens landscape. *Plant Ecology*, 1999, 143:203—218.
- [11] Csillag F, Kabos S. Wavelets, boundaries, and the spatial analysis of landscape pattern. *Ecoscience*, 2002, 9(2):177—190.
- [12] Zu Y G, Zhao Z H, Cong P T, *et al.* An elementary study on the distributional rule of canopy gaps of *Larixgm elinii* forests using wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6):927—931.
- [13] Saunders S C, Chen J Q, Drummer T D, Gustafson E J, Brososke K D. Identifying scales of pattern in ecological data: a comparison of lacunarity, spectral and wavelet analyses. *Ecological Complexity*, 2005, 2, 87—105.
- [14] Gaucherel C, Burel F, Baudry J. Multiscale and surface pattern analysis of the effect of landscape pattern on carabid beetles distribution. *Ecological Indicators*, 2007, 7, 598—609.

- [15] Zhou R, Hu Y Z, Xiong Y, *et al.* Interpreting ecological land cover pattern for the riparian zone of the upper Minjiang River, China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1), 2—10.
- [16] Chen J, Franklin J F, Spies T A. Growing season microclimatic gradients from clearcut edges into old growth Douglas fir forests. *Ecological Applications*, 1995, 5, 74—86.
- [17] Cadenasso M L, Traynor M M, Pickett S T A. Functional location of forest edges: gradients of multiple physical factors. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27, 774—782.
- [18] Davies Colley R J, Payne G W, van Elswijk M. Microclimate gradients across a forest edge. *New Zealand Journal of Ecology*, 2000, 24(2), 111—121.
- [19] Asselin H, Fortin M J, Bergeron Y. Spatial distribution of late successional coniferous species regeneration following disturbance in southwestern Quebec boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140, 29—37.
- [20] Harper K A, Macdonald S E. Structure and composition of riparian boreal forest: new methods for analyzing edge influence. *Ecology*, 2001, 82, 649—659.
- [21] Saunders S C, Chen J, Drummer T D, Crow T R. Modeling temperature gradients across edges over time in a managed landscape. *Forest Ecology and Management*, 1999, 117, 17—31.
- [22] Liu T, Cui Y H, Zhai W, *et al.* Sampling methods of plant community diversity in the desert of the southern edge of Muosuwang region Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2006, 29(3):365—374.
- [23] He Z B, Zhao W Z, Chang X L. The modifiable areal unit problem of spatial heterogeneity of vegetation communities in the transitional zone between oasis and desert. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5):616—622.
- [24] Dale MRT, Mah M. The use of wavelets for spatial pattern analysis in ecology. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(6):805—814.
- [25] Bradshaw G A, Spies T A. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*, 1998, 80(2):205—215.
- [26] Gao W, Li B L. Wavelet analysis of coherent structures at the atmosphere forest interface. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(11):1717—1725.
- [27] Li B L, Loehle C. Wavelet analysis of multiscale permeabilities in the subsurface. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(23):3123—3126.
- [28] 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, 278—282.
- [29] Song Y C. *Vegetation Ecology*. Shanghai: East China Normal University Press, 2001.
- [30] Zhang J T. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press, 2004.
- [31] Xie J B, Liu T, Wei P, *et al.* Ecological application of wavelet analysis in the scaling of spatial distribution patterns of *Ceratoides ewersmanniana*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7):2704—2714.
- [32] Bergkamp G, Cerdà A, Imeson A C. Magnitude-frequency analysis of water redistribution along a climate gradient in Spain. *Catena*, 1999, 37, 129—146.
- [33] Puigdefà bregas J, Sole A, Gutiérrez L, del Barrio G, Boer M. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth Science Reviews*, 1999, 48, 39—70.
- [34] Goberna M, Pascual J A, García C, Sánchez J. Do plant clumps constitute microbial hotspots in semiarid Mediterranean patchy landscapes? *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39, 1047—1054.
- [35] Lopez P J, Montana C. Spatial distribution of *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* in vegetation stripes of the southern Chihuahuan Desert. *Acta Oecologica*, 1999, 20, 197—208.
- [36] Zhang Y M, Chen Y N, Zhang X L. Plant communities and their interrelations with environmental factors in lower reaches of Tarim River. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6):903—910.
- [37] De la Pena N M, Butet A, Delettre Y, *et al.* Landscape context and carabid beetles (Coleoptera: carabidae) communities of hedgerows in western France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94, 59—72.
- [38] Aviron S, Burel F, Baudry J, Schermann N. Carabid assemblages in agricultural landscapes: impacts of habitat features, landscape context at different spatial scales and farming intensity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 108, 205—217.

参考文献:

- [2] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 等. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析. 植物生态学报, 2006, 30(4): 563 ~ 570.
- [3] 张程, 张明娟, 徐驰, 等. 宁夏沙湖几种主要荒漠植物成丛性分析. 植物生态学报, 2007, 31(1): 32 ~ 39.
- [6] 张金屯. 植物种群分布格局的点格局分析. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344 ~ 349.
- [12] 祖元刚, 赵则海, 丛沛桐, 等. 兴安落叶松林(*Larix gmelinii*)林窗分布规律的小波分析研究. 生态学报, 1999, 19(6): 927 ~ 931.
- [15] 周睿, 胡玉喆, 熊颖, 等. 岷江上游河岸带土地覆盖格局及其生态学解释. 植物生态学报, 2007, 31(1): 2 ~ 10.
- [22] 刘彤, 崔运河, 翟伟, 等. 莫索湾南缘沙漠植物群落多样性抽样方法的研究. 干旱区地理, 2006, 29(3): 365 ~ 374.
- [23] 何志斌, 赵文智, 常学礼. 荒漠绿洲过渡带植被空间异质性的可塑性面积单元问题. 植物生态学报, 2004, 28(5): 616 ~ 622.
- [28] 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.
- [29] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [30] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [31] 谢江波, 刘彤, 魏鹏, 等. 小波分析方法在心叶驼绒藜(*Ceratoides ewersmanniana*)空间格局尺度推绎研究中的应用. 生态学报, 2007, 27(7): 2704 ~ 2714.
- [36] 张元明, 陈亚宁, 张小雷. 塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释. 地理学报, 2004, 59(6): 903 ~ 910.