

干旱区群落乔木层对草本层空间格局 及形态特征的影响

张琴妹¹, 张程¹, 刘茂松^{1,*}, 郁文¹, 徐驰¹, 王汉杰²

(1. 南京大学生命科学学院, 南京 210093 2. 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100085)

摘要 运用小波分析及缓冲区分析技术, 对位于宁夏平罗县西大滩的沙枣-芨芨草群落乔木层对草本层的空间格局及形态特征的影响进行了研究。研究发现: (1) 该群落土壤中出现了下层水势低于上层的逆水势层, 反映了根系较深的乔木层主要从土壤较深层次吸收水分, 并影响林下植物的生长; (2) 上层林木冠层投影区芨芨草的空间格局明显有别于非投影区, 小波分析检测出冠层投影区存在与乔木冠幅相对应的特征尺度, 而非投影区芨芨草的分布存在与平均树高及 1.5 倍平均树高相对应的特征尺度; (3) 芨芨草的平均丛径、冠幅、高度等形态特征在离树干约 1.5 倍树高处的变化趋势明显有别于其它区域, 表明林下植物的格局与形态特征不止受冠层荫蔽作用影响。

关键词 梯度带分析 小波分析 格局 形态特征 宁夏

文章编号 1000-0933 (2007) 04-1265-08 中图分类号 Q145 文献标识码 A

The influences of arboraceous layer on spatial patterns and morphological characteristics of herbaceous layer in an arid plant community

ZHANG Qin-Mei¹, ZHANG Cheng¹, LIU Mao-Song^{1,*}, YU Wen¹, XU Chi¹, WANG Han-Jie²

1 School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1265 ~ 1272.

Abstract: Our study objective is to examine the effects of arboraceous layer on the spatial pattern and morphological features of herbaceous layer in *Elacagnus angustifolia*-*Achnatherum splendens* community in Ningxia Autonomous Region. In a 50m × 50m plot, we measured crown diameter, DBH (for *E. angustifolia*), height, and location of every individual by species. A 100 cm soil profile was divided into five strata at 0 - 10, 10 - 30, 30 - 60cm, and 60 - 100 cm in depth and sampled to measure the soil water contents, salinity, and physical and chemical properties. Wavelet analysis and buffer analysis were applied to examine the spatial relationship between the arboraceous and herbaceous layers. Additionally, three 24 m lines marked with A, B and C in the canopy projective region, and two 32 m lines marked with D and E in the open region were randomly placed for measuring individuals that touch the lines. The mean diameter, crown, height and density of *A. splendens* were recorded. We found that the *E. angustifolia* had a mean height of 7.9 m, a mean canopy diameter of 6.5

基金项目 国家重大基础研究计划资助项目 (2006CB400505) ;国家自然科学基金资助项目 (40675040)

收稿日期 2006-03-27 ;修订日期 2006-11-28

作者简介 张琴妹 (1982 ~) ,女,江苏通州人,硕士生,主要从事植物群落学研究. E-mail: zemma.29m@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: msliu@nju.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Program of China (No. 2006cb400505) and National Science Foundation of China (NSFC) (No. 40675040)

Received date 2006-03-27 ; **Accepted date** 2006-11-28

Biography ZHANG Qin-Mei, Master candidate, mainly engaged in plant community. E-mail: zemma.29m@gmail.com

m, and the coverage up to 38.5%, while the dominant herbaceous species, *A. splendens*, contributed 97.8% of the total abundance. Soil moisture at 0–10 cm depth was only 4.67%, but increased with depth with little variation in the 30–100 cm layers. The change in electrical conductivity was inconsistent with soil moisture and reached maximum value of 11.1×10^3 S/cm in the 60–100 cm layer. This suggests that the deeper soil had lower water potential and implied that arbor roots received water mainly from deep soil, causing an anti-gradient soil salinity and water potential, while herbaceous plants tended to use water in shallow soil. Wavelet transform showed that the intrinsic scale was 6.2 m for the canopy projective regions and was 8–12 m in the open area, which corresponded well to the canopy size in the canopy projective regions and 1.5 height of *E. angustifolia* in the open area. Buffer analysis further suggested a more complex relationship. In the arbor canopy vertical projection area, we found no obvious differences in diameter, crown size, and height of *A. splendens*, but from zone 6#, the average crown diameter and the height of *A. splendens* increased gradually along the transect. From zone 10# to 13#, the crown diameter decreased and rapidly reverted in zone 14# and 15#. These results suggested that the control of arboraceous layer on herbaceous layer on spatial pattern and morphological characteristics were influenced not only by canopy shading, but also by other causes such as root distribution pattern as the morphological characters not changed monotonically with distance.

Key Words : gradient belts analysis ; wavelet analysis ; pattern ; morphological characteristics ; Ningxia Autonomous Region

在干旱区及半干旱区,由于降水的不均匀分配和营养元素的缺乏,往往导致群落盖度的下降,形成由相对连续的草本层和不连续的乔木层、灌木层组成的植物群落^[1,2]。近年来气候对植物群落动态变化影响的研究受到重视。干旱区及半干旱区的植物群落由于最容易因受气候影响而产生动态变化,从而引起众多学者致力于研究这类植物群落中不同生活型植物彼此间复杂的功能关系及其对极端环境的适应对策^[3]。

干旱区及半干旱区乔木层和草本层之间的关系一直是研究的热点。一般地,乔木在有效利用水分、矿物质、有机质等方面往往具有优势,并对群落中营养物质的异质分布^[4]、林下草本植物的生产力有重要影响^[5],并能一定程度减少土壤的盐碱化,增加土壤肥力^[6,7];同时,林下植物的生长形态及空间分布特征也会表现出对上层林木覆盖形成的微生境的适应。但关于乔木如何影响草本层的生长状况存在争议;有研究指出,在某些区域,乔木冠层投影区草本植物的生产力高于附近的空旷地,但在另一些地区,冠层投影区草本层的生产力却低于空旷地^[6]。然而,目前很少有研究涉及上层林木对下层植物生长形态、空间格局的影响及其作用范围的研究。

本文选择位于宁夏中部干旱区的典型乔草群落-沙枣-芨芨草群落为研究对象,着重就草本层的空间格局、形态特征与上层林木的相互关系进行了分析研究,以期探讨乔木层对草本层生长状况的影响。

1 研究地概况

研究地位于宁夏回族自治区的平罗县西大滩镇(106°20'E 38°45'N),南距银川市 60 km,西接贺兰山,东濒黄河,海拔 1100 m。该地区日照充足,年平均气温在 4.7~8.1℃之间,年最低平均气温 -19.4~-23.2℃,年最高平均气温 32.4~36.1℃,年均降水量 172.5 mm,7、8、9 三个月降水量占 66.6%,年平均蒸发量达 1755 mm,全年平均相对湿度为 56%,属中温带半干旱荒漠气候。年平均日照时数 2800~3200 h,年最大风力 9 级,最大风速 18 m/s。土壤盐碱化严重。西大滩主要非耕种土壤为白僵土(龟裂碱土),高度碱性,弱度盐化,钙的有效性低,有机质含量极低,土壤遇水高度分散,土壤透气、通水性差,是该地区主要的土壤类型之一^[8]。

2 研究方法

2.1 样方调查及土壤理化指标的测定

调查对象为沙枣(*Elacagnus angustifolia*)-芨芨草(*Achnatherum splendens*)群落,群落中除沙枣、芨芨草外,还零星分布有少量的苦豆子(*Sophora alopecuroide*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、小芦草(*Phragmites australi*)。

群落土壤为白僵土(龟裂碱土)。该群落中的沙枣虽系人工栽植,但造林后经近 40a 的自然演替,形成了相对稳定的乔—草型群落结构,在西北荒漠草原及绿洲区有一定的代表性。

在群落中设一个 50 m × 50 m 的样方,调查样方内所有乔木及草本植物的种类、多度、丛径(草本)、胸径(乔木)、高度、冠幅,并记录每株(丛)植物的中心点坐标。在群落中挖土壤剖面 1 条,分别在土壤剖面的 0 ~ 10 cm、10 ~ 30 cm、30 ~ 60 cm、60 ~ 100 cm 4 个层次取样,每层次 3 个重复,以混合土样测定各层次土壤的理化指标。土壤理化性质测定包括土壤含水量(烘干法)、有机质含量(重铬酸钾氧化-外加热法)、土壤含盐量(电导法)。

2.2 小波分析

小波分析(wavelet analysis)是在傅立叶(Fourier)分析基础上发展起来的一种数学方法,它不但能从尺度(或频率)的角度分析格局,而且能将格局、尺度与具体空间位置明确地表示出来^[9]。由于不要求数据具有恒定的均值或方差,自 20 世纪 80 年代引入生态学领域以来,小波分析已在森林中的林窗结构^[9]、林窗疏密分布的特征尺度^[10]、城市热岛的多时间尺度结构^[11]等诸多领域得到了广泛的应用。

设 $f(t)$ 是平方可积函数(记作 $f(t) \in L^2(R)$) 其一维连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{1}$$

$W_f(a, b)$ 为小波变换系数,其中 a 为尺度因子, b 为平移因子。经过小波变换后的结果是尺度(移动窗口的大小)和具体时间(空间)位置的函数,尺度特征可通过计算小波方差(wavelet variance)加以识别。小波方差的计算公式为:

$$V_{(a)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_f^2(a, b_j) \tag{2}$$

式中 n 为数据向量长度。小波分析的基小波不是唯一的,所有满足小波条件的函数都可以作为基小波函数,本研究选择最为常用的 Morlet 基小波,其解析式为:

$$\varphi(x) = Ce^{-\frac{x^2}{2}} \cos 5x \tag{3}$$

在样地中冠层投影区随机选取 24 m 长样线 3 条 A、B、C,在相对空旷区域(非冠层投影区)地段随机选取 32 m 长样线 2 条 D、E,沿每条样线作 1 m 宽的缓冲区,然后沿样带每 1 m 截取一个小样方,对每个小样方内芨芨草的数目做一维 Morlet 小波分析,研究样地内芨芨草格局的尺度特征(图 1)。小波变换及有关计算在 MATLAB 6.5 小波分析工具箱的支持下完成。

2.3 冠幅梯度带分析

为研究沙枣冠层对草本层的影响,假定乔木冠幅为圆形,以沙枣坐标为中心点,沙枣的胸高断面为扩展边缘,冠幅直径的 20% 为单位做缓冲区(buffer)向四周扩展。由于沙枣树个体大小不一,冠幅不等,所以选择相对距离作为扩展单位比绝对距离更为合理。考虑到边缘外围未记入样方数据的沙枣树的冠层对边缘草本影响甚大,所以由四周向中心,以沙枣个体冠幅的最大值做缓冲区以消除边缘效应的影响。随着环带的外延和相互融合,冠幅梯度带覆盖了整个统计区的所有草本,最终扩展距离为冠幅直径的 320%。这样由沙枣坐标中心向外生成了由 15 个环带组成的冠幅梯度带,分别将这 15 个环带命名为环带 1、环带 2、...、环带 15。将沙

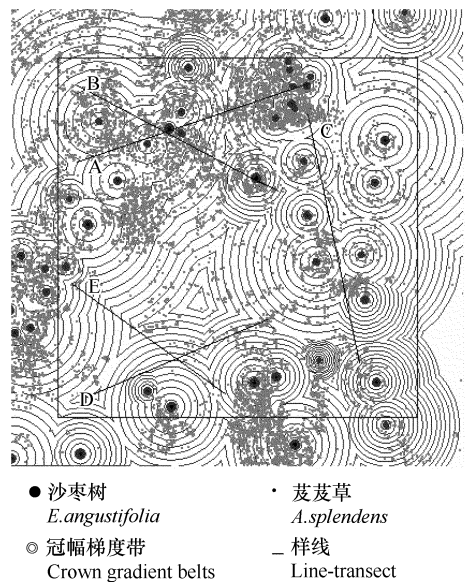


图 1 冠幅梯度带分析

Fig. 1 The sketch of crown gradient belts analysis

枣冠幅梯度带图层和芨芨草图层进行叠加分析,分别统计各冠幅梯度带内芨芨草的密度、丛径、冠幅、高度。相关数据处理在 ArcGIS 9.0 中完成(图 1)。

3 结果与分析

3.1 群落组成、结构和土壤条件分析

群落位于黄灌区,地下水埋深较浅,群落总盖度较高。群落中上层沙枣树的造林已逾 40 年,样地中沙枣树平均树高 7.9 m,平均冠幅 6.5 m,平均胸径 29.0 cm,冠层投影盖度达 38.5%。群落林下植物主要由芨芨草组成,约占群落总盖度的 97.8%,还有少量的白刺、苦豆子等。群落中芨芨草平均丛径 7.2 cm,平均株高 43.8 cm。样地中芨芨草与沙枣交错镶嵌,呈斑块状分布(图 1)。

样地浅层土壤含水量仅 4.67%,深层含水量有所增加,30~100 cm 深处土壤含水量差别不大。但 60~100 cm 深处土壤含盐量最高,其电导率达 11.1×10^3 s/cm,可见土壤中存在一个下层水势低于上层水势的水势梯度。究其原因,在干旱区降水量远少于蒸散发量,地下水是群落中植物利用的主要水源,对于蒸腾能力较强的沙枣树尤其如此^[2]。沙枣树根系较深,上述水势梯度的出现说明沙枣能对较深层次的土壤水进行利用,同时也一定程度“阻断”了地下水的上行,并导致 60~100 cm 层次土壤含水量较低而含盐量较高。

表 1 群落土壤理化性质简表

Table 1 The physical and chemical properties of the soil

土壤层次 Depth of soil (cm)	含水量 Soil water content (%)	电导率 Electrical conductivity (S/cm)	有机质含量 Soil organic matter content (%)
0~10	4.67	5.00×10^3	1.12
10~30	11.79	6.88×10^3	0.80
30~60	14.50	6.16×10^3	0.10
60~100	14.54	11.1×10^3	0.61

60 cm 以上各层土壤含水量依次减少,但含盐量在 10~30 cm 高于 0~10 cm,土壤水势稍低,说明浅根系草本植物芨芨草的根系吸水主要集中在土壤浅层的 10~30 cm 处,乔、草吸水层次有明显的不同^[3]。David 在研究半干旱区植物与土壤含水量的异质性时发现,不同生活型物种对水分利用的层次有所不同,不过不同生活型植物对土壤不同深度水分的利用状况仅从土壤含盐量(电导率)、含水量进行推断显然不够充分,尚需进行较深入的研究,但土壤中因上层林木造成的逆水势层必然影响浅根系草本植物的生长,并影响其空间格局。

3.2 沙枣冠层对草本层空间格局的影响

对选取的 5 条样线进行一维连续 Morlet 小波变换后,得到各自的小波方差图(图 2)。图中每个小波方差峰值代表一个特定的分析尺度^[4],将这些峰值所对应的分析尺度提取出来,分别绘制对应的小波变换系数图,并检测芨芨草分布格局的特征尺度(图 3)。

比较各样线小波方差图发现,样线 A、B、C 方差曲线均在 $a=5$ 处出现波峰,其各自对应小波系数曲线存在明显的周期性,周期长度分别为 6.6 m 和 6.5 m,平均 6.2 m。样线 B、C 在 $a=13$ 和 $a=14$ 虽然也出现波峰,但小波变换的波形过于简单,再加上边界效应的存在,几乎检测不出有价值的信息。样线 D 和 E 的小波方差曲线峰值分别出现在 $a=6$ 、 $a=11$ 和 $a=10$ 处,对应的小波系数图分别检测出 8、13 m 和 12 m 的特征尺度。由此可见,沙枣树冠层投影区芨芨草分布普遍存在约 6.2 m 的特征尺度,与沙枣树的平均冠幅 6.5 m 相当接近,而在非投影区芨芨草的空间分布具有与平均树高(8.0 m)及树高的 1.5 倍相对应的特征尺度,与冠层覆盖区有明显不同,反映了乔木层对林下芨芨草的分布格局有显著影响。

3.3 沙枣冠层对草本层生长形态的影响

以沙枣树为中心,通过冠层梯度带分析,研究芨芨草的生长形态与沙枣树距离的关系(图 4)。结果表明,在 1~5 环带,无论芨芨草的丛径、冠幅还是高度均相差不大,植株表型相似,曲线波动很小。从环带 6 到环带 10,芨芨草的平均冠幅和高度沿冠幅梯度带持续增加,平均丛径呈上升趋势,但环带 10 至环带 13,变化

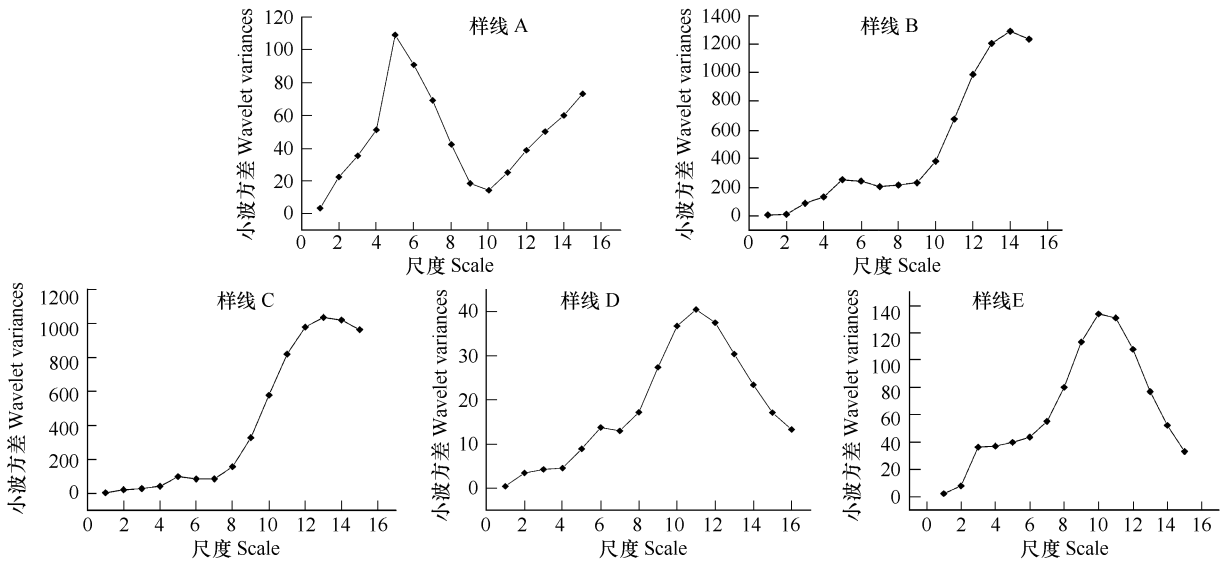


图2 各样线小波变换方差曲线

Fig.2 Wavelet variance of each transect

趋势发生变化,平均丛径、冠幅等指标开始下降,至环带 14 又迅速回升,并在最外围的环带 15,芨芨草的平均丛径、冠幅、高度都达到最大值,分别为 12.73、71.75 cm 和 88.16 cm,但密度变化趋势却刚好相反。

有研究表明,乔木通常因冠形、冠层结构的差异或树种的不同以及林分密度的大小而对林下植被的生长、分布产生较大影响^[15~17]。一般认为主要由于上层林木对林下光照条件的影响所致,然而在半干旱区,日照充沛,辐射强烈,植被稀少,干旱少雨的气候条件往往使水分成为主要的限制因子,并对植物存活、生长形态、净生产力等具有极其重要的影响^[18~20]。

早期研究发现,干旱区乔木冠层能减少 45%~65% 的太阳辐射,降低 5~11℃ 的土壤温度,增加冠幅下土壤中的 TN、TP、TK 的含量^[4,5]。研究地中林下的表、浅层土壤含水量分别为 6.77%、4.67%,而空旷地分别为 0.92%、2.25%,这与 Akpo 在研究萨赫勒地区半荒漠植被时指出的冠幅下表、浅层土壤含水量高于空旷地是一致的。许多研究表明,干旱、半干旱区灌木或乔木冠幅下土壤水分、养分、微生物等土壤资源出现显著聚集现象^[21~25]。林下相对优越的生境条件,使沙枣冠幅垂直投影区内的芨芨草密度远高于空旷区。但光照的不足,同时也使强阳性的芨芨草的生长受到抑制,株形矮小。

通过 SunScan SS-1 测定,沙枣冠层 LAI 达 2.9。冠层垂直投影区内芨芨草因上层乔木荫蔽而减少了阳光直射,对其生长有一定影响。观察发现,林下芨芨草不仅矮小,也相对较嫩,形态上与冠层荫蔽密切相关,但同时,树冠投影区阳光直射少,植株蒸腾失水也大为减少,一定程度上缓解了干旱胁迫,可以支持较大的草本层植株密度。

从环带 6 开始,随着与沙枣树距离的增大,冠层荫蔽作用逐渐减弱,光照充足,芨芨草的平均丛径、冠幅、高度开始持续增加。丛径、冠幅、高度的增加必然导致植物根区水分竞争加剧,尽管离沙枣树距离稍远,但土壤水分总体上难以支持较高的植株密度,表现为群落盖度下降,植株密度减小。在干热风经常成为植物失水的主要胁迫的情况下,光照充足同时也导致芨芨草蒸腾失水胁迫的加强,植物丛径增加或成丛生长可形成丛内局部微生境,降低风速,增加湿度,提高水分的利用效率,一定程度上可缓解植株蒸腾失水胁迫。

但环带 10~13 中断了芨芨草丛径、冠幅、高度增加的趋势,直到环带 14 才又恢复上升。环带 10 到环带 13 对应沙枣冠幅 200% 到 260% 的区域,也就是平均 13~17 m 区域。有研究指出,成年沙枣树根系末端水平分布的主要区域约相当于树高的 1~1.5 倍^[26],根系末端大量须根对土壤水分和养分的吸收可能造成对芨芨草生长的限制,并导致平均丛径、冠幅、高度有所下降。

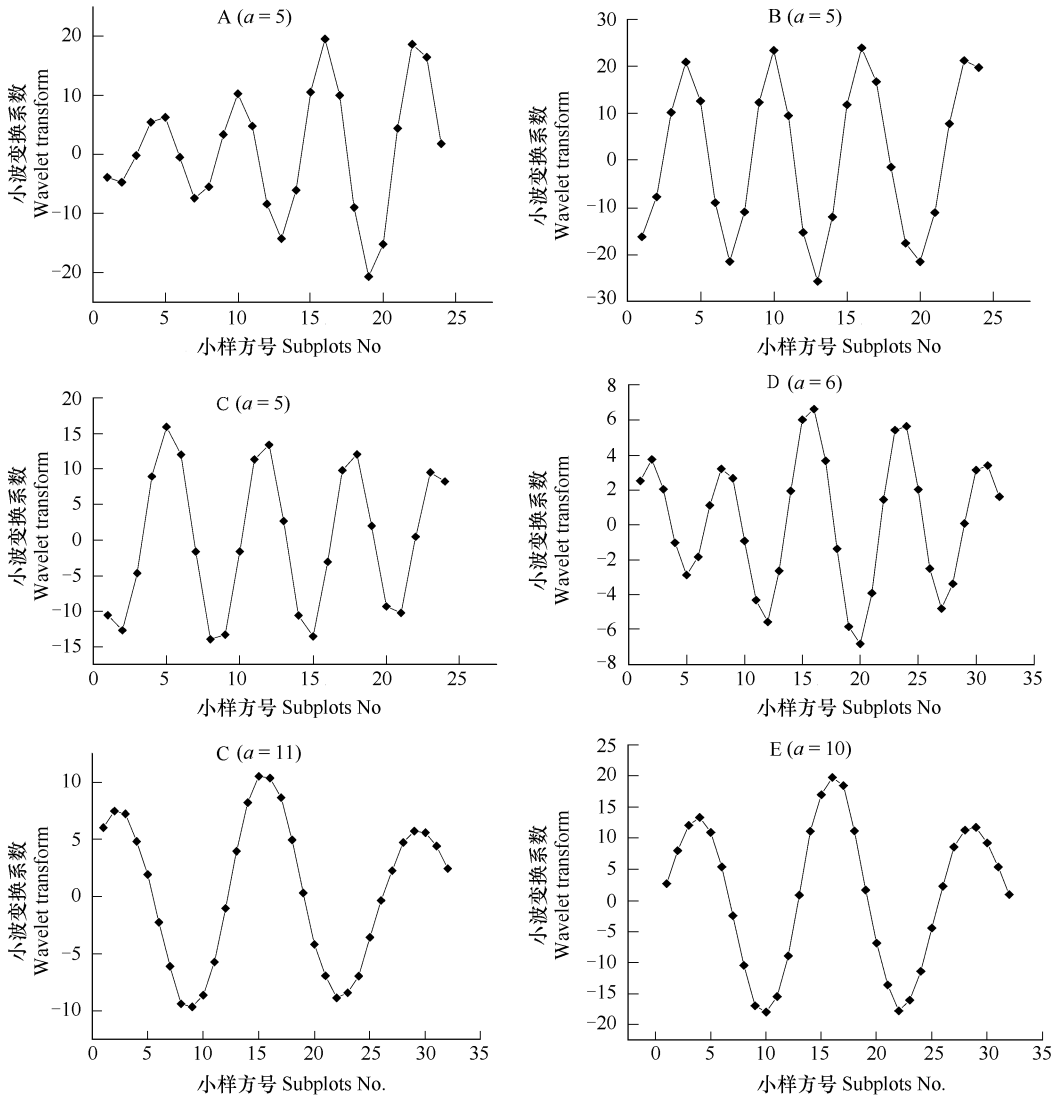


图3 Morlet 小波系数曲线图

Fig. 3 Curves of wavelet transform using Morlet wavelet

4 结论

通过对群落中植物组成与群落结构特征的分析及土壤各层次含水量、电导率的比较研究,揭示了荒漠植物群落中不同生活型的植物对土壤中水分的吸收与利用的深度不同,并影响土壤中不同层次间的水势梯度。

群落结构特征分析表明,乔木层冠层投影对群落中林下植物的形态及空间格局有显著影响。一般地,芨芨草的密度随着与沙枣树距离的增大逐渐减小,乔木冠幅下的芨芨草密度远高于空旷地带。Morlet 小波分析发现,乔木层冠层投影区内芨芨草格局也明显有别于空旷地带,并且存在与乔木冠幅相对应的特征尺度,而非投影覆盖区则存在与树高 1 倍与 1.5 倍相近的特征尺度。投影区与非投影区格局特征的差异性说明林下植物的空间格局分布受乔木层影响很大。

芨芨草的形态特征随离树干的距离发生明显变化,但其变化趋势在相当于树高 1.5 倍的区域明显有别于其它区域。该现象一方面进一步说明了乔木层对下层草本植物的形态特征有明显的影 响,同时也揭示了群落中植物间相互作用的复杂性。与土壤中水势梯度一样,树木根系分布与下木层植物的形态与格局特征间关系的研究都有待进一步的深入。

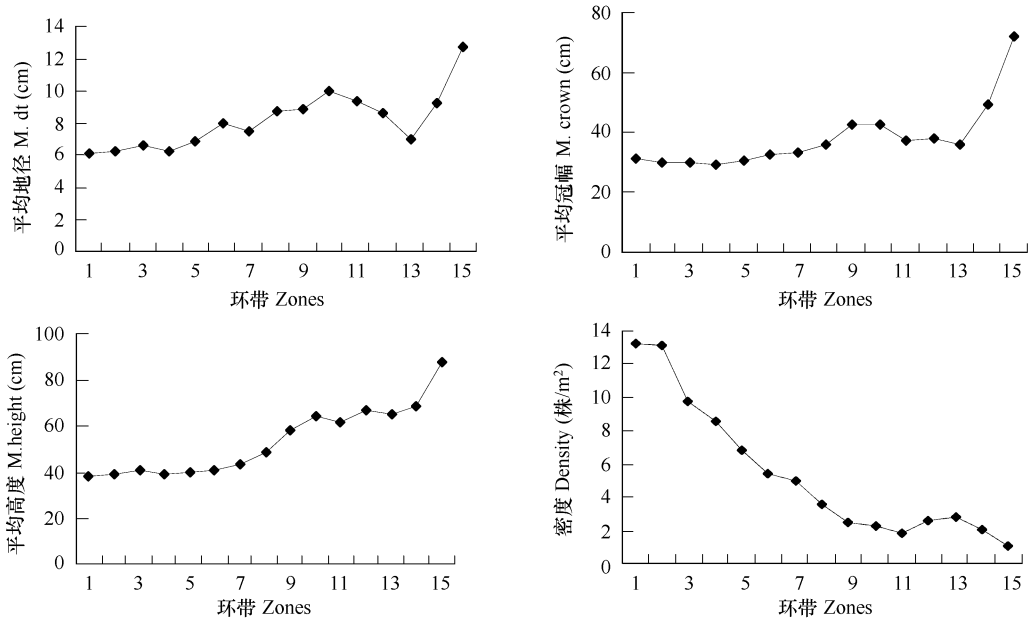


图4 芨芨草平均地径、冠幅、高度、密度在环带中的变化

Fig. 4 Mean diameter, crown, height, density of *A. splendens* along the zones

References :

- [1] Scholes R J, Archer S R. Tree-grass interactions in savannas. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1997, 28 : 17 - 44.
- [2] Akpo L E. Phenological interactions between tree and understory herbaceous vegetation of a Sahelian semi-arid savanna. *Plant Ecology* ,1997 ,131 (2) :241 - 248.
- [3] Breshears D D, Barnes F J. Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for semiarid landscapes within the grassland/forest continuum : a unified conceptual model. *Landscape Ecology* , 1999 , 14 (5) :465 - 478.
- [4] Brown J R , Archer S. Shrub invasion of grassland : Recruitment is continuous and not regulated by herbaceous biomass or density. *Ecology* , 1999 , 80 :2385 ~ 2396.
- [5] Grouzis M , Akpo L E. Influence of tree cover on herbaceous above- and below-ground phytomass in the Sahelian zone of Senegal. *Journal of Arid Environments* , 1997 , 35 : 285 - 296.
- [6] Belsky A J , Amundson R G , Duxbury J M , et al. The effects of trees on their physical , chemical and biological environments in a semi-arid savanna in Kenya. *Journal of Applied Ecology* , 1989 , 26 : 1005 - 1024.
- [7] Belsky A J , Mwonga S M , Amundson R G , et al. Comparative effects of isolated trees on their undercanopy environments in high-and low-rainfall savannas. *Journal of Applied Ecology* , 1993 , 30 : 143 - 155.
- [8] Feng R , Yin J W. Reviews and prospects on improvement of saline-alkali field in Ningxia in the past 50 years Ningxia. *Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology* , 2000 , 1 : 25 ~ 30.
- [9] Bradshaw G A , Thomas A S. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology* , 1992 , 80 : 205 - 215.
- [10] Zu Y G , Zhao Z H , Cong P T , et al. An elementary study on the distributional rule of canopy gaps of *Larix gmelinii* forests using wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica* , 1999 , 19 (6) : 27 - 931.
- [11] Jiang T H , Shu J , Deng L T. Wavelet characteristics of urban heat island in Shanghai City. *Journal of Tropical Meteorology* , 2004 , 20 (5) : 515 - 522.
- [12] Zhao M , Li A D , Wang Y L , et al. A study on relations between transpiration of psammophyte and the meteorological components. *Journal of Arid Land Resources and Environment* 2003 , 17 (6) : 131 ~ 137.
- [13] Russell L S , Watts C. The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy , semiarid woodland. *Agricultural and Forest Meteorology* , 2003 , 114 : 127 - 139.
- [14] Chui C K. Cheng Z X , Trans. *An Introduction to Wavelets*. Xi'an : Xi'an Jiao Tong University Press , 1995. 80 ~ 86.
- [15] Donald M , Charles B. H , Cara R N. Overstory influences on herb and shrub communities in mature forests of western Washington , U. S. A. *Can*

J For Res ,2000 ,30 (10) :1655 ~ 1666.

- [16] David R T , Andrew B C. Manipulation of density of *Pseudotsuga menziesii* canopies : preliminary effects on understory vegetation. Can J For Res , 2001 ,31 (9) :1513 ~ 1525.
- [17] Sheng W T. A long-term study on development and succession of undergrowth vegetation in Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations with different density. Forest Research ,2001 ,14 (5) :463 ~ 471.
- [18] Holah J C , Wilson M V , Hansen E M. Effects of a native forest pathogen , *Phellinus weirii* , on Douglas-fir forest composition in western Oregon. Can J For Res ,1993 ,23 :2473 ~ 2480.
- [19] Noble P S. Root distribution and seasonal production in the northwestern Sonoran desert for C3 shrub , a C4 bunchgrass , and a CAM leaf succulent. American Journal of Botany ,1997 ,84 :949 ~ 955.
- [20] He Y L. Review of studies on understorey of plantations. Forest Research ,2002 ,15 (6) :727 ~ 733.
- [21] Schlesinger W H , Raikes J A , Hartley A E , et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. Ecology ,1996 ,77 :364 ~ 374.
- [22] Kieft T L , White C S , Loftin S R , et al. Temporal dynamics in soil carbon and nitrogen resources at a grassland-shrubland ecotone. Ecology , 1998 ,79 :671 ~ 683.
- [23] Stock W D , Dlamini T S , Cowling R M. Plant induced fertile islands as possible indicators of desertification in a succulent desert ecosystem in northern Namaqualand , South Africa. Plant Ecology ,1999 ,142 :161 ~ 167.
- [24] Hirobe M , Ohte N , Karasawa N , et al. Plant species effect on the spatial patterns of soil properties in the Mu-us desert ecosystem , Inner Mongolia , China. Plant and Soil ,2001 ,234 (2) :195 ~ 205.
- [25] Chen G S , Zeng D H , Cheng F S , et al. A research review on "fertile islands " of soils under shrub canopy in arid and semi-arid regions. Chinese Journal of Applied Ecology ,2003 ,14 (12) :2295 ~ 2300.
- [26] Ma L Q. Root system investigations of some tree species crowing in Wuwei prefecture , Gansu. Journal of Ecology ,1987 6 (2) :13 ~ 17.

参考文献 :

- [8] 冯锐 茵济文. 宁夏盐碱土改良工作 50 年回顾与展望. 宁夏农林科技 ,2000 ,1 :25 ~ 30.
- [10] 祖元刚,赵则海,丛沛桐,等. 兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林林窗分布规律的小波分析研究. 生态学报,1999 ,19 (6) :927 ~ 931.
- [11] 江田汉,束炯,邓莲堂. 上海城市热岛的小波特征. 热带气象学报,2004 ,20 (5) :515 ~ 522.
- [12] 赵明,李爱德,王耀琳,等. 沙生植物的蒸腾耗水与气象因素的关系研究. 干旱区资源与环境,2003 ,17 (6) :131 ~ 137.
- [14] 崔锦泰著. 程正兴译. 小波分析导论. 西安:西安交通大学出版社. 1995. 80 ~ 86.
- [17] 盛炜彤. 不同密度杉木人工林林下植被发育与演替的定位研究. 林业科学研究,2001 ,14 (5) :463 ~ 471.
- [20] 何芝玲. 人工林林下植被的研究现状. 林业科学,2002 ,15 (6) :727 ~ 733.
- [25] 陈广生,曾德惠,陈伏生,等. 干旱和半干旱地区灌木下土壤 "肥岛" 研究进展. 应用生态学报,2003 ,14 (12) :295 ~ 2300.
- [26] 马良清. 甘肃武威地区几个树种根系的调查报告. 生态学杂志,1987 ,6 (2) :13 ~ 17.