

# 基于 MSO 方法的 2 个油蒿群落格局对比研究

李慧勇<sup>1,2</sup>, 李慧卿<sup>1\*</sup>, 李清河<sup>1</sup>, 张景波<sup>3</sup>, 张国庆<sup>3</sup>, 江泽平<sup>1</sup>

(1. 国家林业局林木培育重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;

2. 山西省水利水电科学研究院, 山西 太原 030002; 3. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

**摘要:**应用多尺度排序法(multiscale ordination, 简称为 MSO), 对乌兰布和沙漠东北缘黄河水与井水 2 种灌溉模式绿洲外围的半固定油蒿群落进行多种群格局对比研究。结果表明: 在黄灌区, 油蒿不仅是群落的优势种(重要值为 45.26%), 而且对植被格局的贡献率也最高; 83.84% 的植被形成了油蒿单种群格局, 且油蒿贡献率高达 0.889 6。在井灌区, 植物种对格局的贡献率与其在群落中的重要值明显不一致: 油蒿是群落的优势种(重要值为 47.41%), 但在植被格局中的贡献率明显下降, 只有 15.54% 的植被形成了以油蒿为主的格局; 沙冬青、白刺却相反, 它们在植被格局中的贡献率远远高于其在群落中的重要值。对比 2 区段的其它格局特点还发现: 井灌区油蒿群落植被的斑块化现象更严重一些, 并且油蒿斑块内的格局强度低于黄灌区。

**关键词:**油蒿; 多尺度排序法; 多种群格局; 贡献率; 重要值

中图分类号: S718.54

文献标识码: A

## Analysis on Pattern Characters of the Two *Artemisia ordosica* Communities by MSO

LI Hui-yong<sup>1,2</sup>, LI Hui-qing<sup>1</sup>, LI Qing-he<sup>1</sup>, ZHANG Jing-bo<sup>3</sup>, ZHANG Guo-qing<sup>3</sup>, JIANG Ze-ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Shanxi Water Resource and Hydraulics Research Academy, Taiyuan 030002, Shanxi, China;

3. Desert Forestry Experimental Center, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** The patterns of two semi-fixed *Artemisia ordosica* communities outside the oasis on the northeast of Ulanbuhe desert irrigated by Yellow River and well water were analyzed with the method of Multiscale Ordination (MSO). The results showed that: in the communities outside the oasis irrigated by Yellow River, *A. ordosica* was not only the dominated species in the communities (the importance value was 45.26%) but also the greatest contributor to the pattern. It occupied a proportion of 83.84% of the vegetation with the contribution rate as high as 0.889 6. In the communities outside the oasis irrigated by well water, the contribution of species to the pattern was different from the importance value to community. *A. ordosica* was the dominated species in the communities (the importance value was 47.41%), but its contribution to the pattern decreased very much. It was inversely for *Ammopiptanthus mongolicus* and *Nitraria tangutorum* whose contribution to the pattern was much higher than the importance value to community. Comparing with other pattern characters of the two communities, it showed that the pattern number outside the oasis irrigated by well water was more and the pattern intensity of *A. ordosica* was lower.

**Key words:** *Artemisia ordosica*; multiscale ordination; multispecies pattern; contribution; importance value

收稿日期: 2010-07-12

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(RIF2010-04)

作者简介: 李慧勇(1975—), 男, 副研究员, 主要从事农水、水土保持以及生态学方面的研究。

\* 通讯作者: 李慧卿(1971—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事植物地理及荒漠化防治方面的研究。E-mail: Lihuiqing@forestry.ac.cn

“格局是生态研究的最后领域”<sup>[1]</sup>已成为生态学界的共识<sup>[2-5]</sup>。随着全世界范围内的研究者对格局重要性认识的提高<sup>[6-7]</sup>,格局研究已成为生态学发展最快的热点研究之一<sup>[7]</sup>。群落里有多个种群,但将各个种群空间信息累加起来并不能得到整个群落的格局特性,因此,研究群落内的多种群格局意义重大。多尺度排序法(multiscale ordination, 简称为MSO),由Noy-Meir等<sup>[9]</sup>创造并经过Ver Hoef等<sup>[10]</sup>修正以及Dale等<sup>[11]</sup>进一步修正,现成为国际上研究多种群格局的首选方法和应用频率最高的方法<sup>[7,11]</sup>,在国内却刚开始<sup>[12-14]</sup>,它能有效鉴别出多种群多尺度的斑块,并成功评价在格局尺度上多种群的关联性及其关联程度,而这是传统排序方法所做不到的<sup>[10]</sup>。

油蒿(*Artemisia ordosica* Kraschen.)是我国特有的优良固沙半灌木植物,耐旱、抗风沙,也是我国西北沙区重要的天然植物种之一。国内对油蒿空间格局有少量的研究<sup>[15-18]</sup>,而且主要是从单种群角度出发的。本文应用多尺度排序法,对2个半固定油蒿群落格局特点进行分析,为绿洲建设提供一定的依据。

## 1 研究区概况及调查分析方法

### 1.1 研究区概况

乌兰布和沙漠位于内蒙古河套平原西南部,属于亚洲中部温带荒漠气候区(39°19'~40°57'E, 106°09'~106°57'N)。总面积 $1.298 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是我国八大沙漠之一。该区平均气温8.5℃,年降水量80~150 mm,年蒸发量高达3 500 mm,蒸发量是降水量的23~44倍,植被以沙生灌木或半灌木为主。

在乌兰布和沙漠东北缘黄河水与井水2种灌溉模式绿洲外围,选择半固定油蒿群落。黄灌区样地选择在中国林科院沙林中心实验一场南大滩,受黄河灌溉的影响,地下水位平均为3 m左右,群落内灌木植物有油蒿、籽蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)和白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.),草本植物有沙米(*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.)、虫实(*Corispermum mongolicum* Iljin)、五星蒿(*Bassia dasyphylla* (Fisch. Et Mey.) Kuntze)和沙竹(*Psammodochloa villosa* (Trin.) Bor)。井灌区样地选择在沙林中心实验四场东南,地下水位平均为9 m左右,群落内灌木植物有油蒿、籽蒿、白刺及沙冬青(*Ammodiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) Cheng

f.),草本植物有沙米、沙竹、五星蒿、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、薊(*Cirsium* Mill.)和虫实。2群落内均为缓平沙丘类型。

### 1.2 调查及数据分析方法

在2个群落内分别沿垂直于主害风方向布置1条样带。在每条样带上取连续小样方512个,每个小样方的面积为50 cm × 50 cm,在每个小样方中,分别记录所有植物种的盖度,用于多种群格局分析。

(1)多种群格局尺度 采用多尺度排序法<sup>[9-10]</sup>,具体计算过程为:先用Hill的双项轨迹方差法(TTLQV)<sup>[19]</sup>,计算出所有种在不同区组上的协方差矩阵 $C_b$ (本文最大区组数为256),然后将其相加,得出和矩阵 $C$ 进行主成分分析(PCA),找出主成分及特征值;再将特征值分配到不同区组的协方差矩阵中,那么对于每一排序轴 $i$ ,在每一区组上都有一个方差 $W_{i(b)}$ ,其中 $W_{i(b)}$ 的求法<sup>[10]</sup>如下:

假设主成分特征值为 $\lambda_i$ ,其相应的特征向量为 $V$ ,那么

$$CV = V\lambda_i \text{ 且 } V'V = 1,$$

$$CV = V\lambda_i \text{ 可以写成 } V'CV = \lambda_i, \text{ 那么}$$

$$\lambda_i = V'(C_1 + C_2 + \dots + C_b)V = V'C_1V + V'C_2V + \dots + V'C_bV = W_{i(1)} + W_{i(2)} + \dots + W_{i(b)}$$

将分配的主成分特征值(方差) $W_{i(b)}$ 与区组大小作图,顶点或峰值处存在格局。

(2)多种群格局强度 采用Dale等<sup>[11,19]</sup>的建议,格局强度 $J_{i(b)}$ 由分配在不同区组的主成分特征值(方差) $W_{i(b)}$ 计算而得,公式 $J_{i(b)} = \sqrt{6bW_{i(b)}/(b^2 + 2)}$

(3)多种群格局一致性 Dale等<sup>[11]</sup>推算出的在不同排序轴及不同区组上的格局一致性指标为:

$$M_{i(b)} = J_{i(b)} / \sum_j D_j$$

不同排序轴的植被格局一致性指标为:

$$M_{ii} = \sum_b M_{i(b)}$$

式中: $C_b$ 为不同区组上的协方差矩阵; $C$ 为协方差和矩阵; $i$ :排序轴; $b$ :区组; $M$ :格局一致性指标; $j$ :植物种; $D$ :盖度; $J$ :格局强度; $W$ :方差。

(4)植物种对格局的贡献率分析 采用Dale等<sup>[11]</sup>建议的方法:

每个特征变量都是原植物种变量的线性组合,即 $y_i = \sum_j u_{ij}x_j$ ,并且 $\sum_j u_{ij}^2 = 1$

因此用  $u_{ij}^2$  来评价不同植物种对格局的贡献率。

(5) 植物种在群落中的重要值

重要值 = (相对盖度 + 相对频度) / 2

(6) 样带上植被的变化 在每一个样方中,将所有植物种的盖度与其在特征向量中得分的乘积相加,然后求其平均值,得到样方加权平均值,再根据样方位置作图<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 群落间盖度差异性分析

对2个群落内植被盖度(灌木加草本)、灌木盖度以及草本盖度分别进行群落间的单因素方差分析,结果(表1)表明:2个群落在植被盖度间差异显著,灌木盖度间以及草本盖度间亦显著。调查结果表明:黄灌区和井灌区外围半固定油蒿群落的植被平均盖度分别为8.41%、6.62%,灌木平均盖度为7.81%、5.31%,草本平均盖度为0.06%、1.31%。

表1 2个油蒿群落植物盖度差异性分析

| 分析对象 | 方差来源 | 自由度 | 平方和           | 均方            | F 值   | P       |
|------|------|-----|---------------|---------------|-------|---------|
| 植被盖度 | 群落间  | 1   | 11 314 945.10 | 11 314 945.10 | 83.52 | <0.0001 |
| 灌木盖度 | 群落间  | 1   | 9 741 970.40  | 9 741 970.40  | 70.98 | <0.0001 |
| 草本盖度 | 群落间  | 1   | 58 833.66     | 58 833.66     | 50.33 | <0.0001 |

注:显著水平为0.05。

### 2.3 黄灌区外围半固定油蒿群落格局特点

2.3.1 多种群格局的特点 根据群落内所有植物种盖度在不同区组上的协方差和矩阵的主成分分析结果,选择了前2个主成分,其解释的植被信息量分别占83.84%、14.81%。

从图1第1主成分的区组方差图可以看出:在区组105和171处存在着明显的斑块,斑块长度分别为52.5、85.5 m;格局强度为0.114 6、0.089 5,一致性为0.261 3、0.204 0。在区组5和248处,虽然分配的主成分特征值较低,但也出现了明显的峰值,这说明在小范围内,植被也出现了类似性质的斑块。格局强度为0.255 3、0.023 2,一致性为0.582 1、0.053 0。在这个类型的斑块中,油蒿的贡献率达到0.889 6(表2),其它植物种贡献率较低,说明这个类型的斑块基本为油蒿单种群斑块。从植物种在特征向量中的得分,可以看出斑块内的种间关系,即:分数相似,趋向于正关联,并且分数越大,关联程度越密切<sup>[10]</sup>。由表2看出:在第1主成分解释的植被格局中,油蒿与籽蒿成正关联,并且关联程度较密切;而与白刺、沙米、虫实及五星蒿呈微弱的负关联关系。

### 2.2 群落植物种组成及重要值分析

对2个群落进行植物种组成及重要值分析发现:在黄灌区外围群落中,有7种植物组成,其中灌木种油蒿的重要值最高,为45.26%;草本植物沙米次之,为23.92%;其次为灌木种白刺和籽蒿,重要值分别为14.15%、14.04%;其余的植物种为草本植物虫实、五星蒿及沙竹,重要值均较低,分别为2.24%、0.20%、0.20%。在井灌区外围,共有10种植物组成,其中灌木植物种油蒿重要值最高,为47.41%;其次为草本植物种猪毛菜、五星蒿,重要值分别为26.78%、10.39%;其它植物种还包括有沙竹、虫实、籽蒿、蓟、沙米、白刺和沙冬青,重要值相对较低,分别为4.96%、2.94%、2.85%、1.99%、1.77%、0.62%、0.28%。从重要值分析可以看出:本文在黄灌区和井灌区外围选择的2个群落都为典型油蒿群落。

从图2第2主成分的区组方差图可以看出:区组256处存在长度为128 m的斑块,占较大的植被信息量,区组13处存在长度为6.5 m的斑块,占植被信息量较小。第2主成分解释的这个类型的斑块是以籽蒿和白刺为主的斑块(表2),贡献率分别为0.625 4、0.251 5;油蒿和沙米的贡献率次之,虫实、五星蒿和沙竹的贡献率可以忽略。斑块内,籽蒿与白刺、油蒿表现出较强的负关联,而与沙米成一定的正关联。

表2 黄灌区外围半固定油蒿群落多种群格局内植物种的向量得分和贡献率

| 植物名 | 第1主成分    |         | 第2主成分    |         |
|-----|----------|---------|----------|---------|
|     | 向量得分     | 贡献率     | 向量得分     | 贡献率     |
| 油蒿  | 0.943 2  | 0.889 6 | -0.305 4 | 0.093 3 |
| 籽蒿  | 0.312 1  | 0.097 4 | 0.790 8  | 0.625 4 |
| 白刺  | -0.100 7 | 0.010 1 | -0.501 5 | 0.251 5 |
| 沙米  | -0.053 8 | 0.002 9 | 0.171 5  | 0.029 4 |
| 虫实  | -0.001 1 | 0.000 0 | 0.019 5  | 0.000 4 |
| 五星蒿 | -0.000 1 | 0.000 0 | 0.000 3  | 0.000 0 |
| 沙竹  | 0.000 0  | 0.000 0 | -0.000 2 | 0.000 0 |

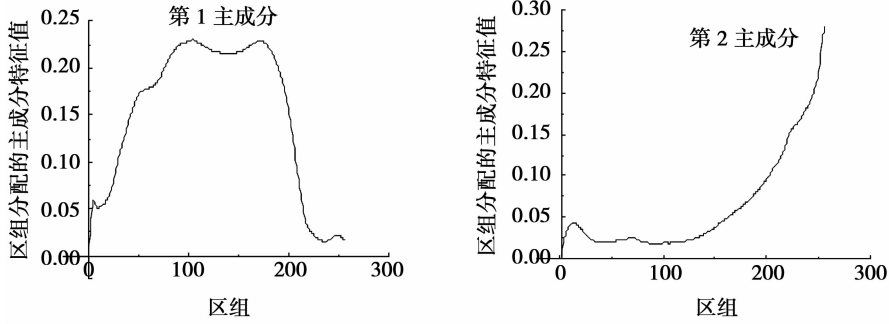


图1 黄灌区外围半固定油蒿群落主成分区组方差图

2.3.2 样带上植被的变化 通过对样方内植物种盖度进行加权平均作图,从而能在图上更直观看到不同植物种在样带上的分配,以及其盖度大小的变化。综合分析图2与表2可知:第1主成分中平均值最高的样方以油蒿为主,较高的以籽蒿为主,接近

0的以五星蒿、虫实、沙米、白刺或空样方为主。第2主成分中平均值最高的样方以籽蒿为主,最低(负分)的样方以白刺、油蒿为主,接近0的以五星蒿、虫实、沙米或空样方为主。

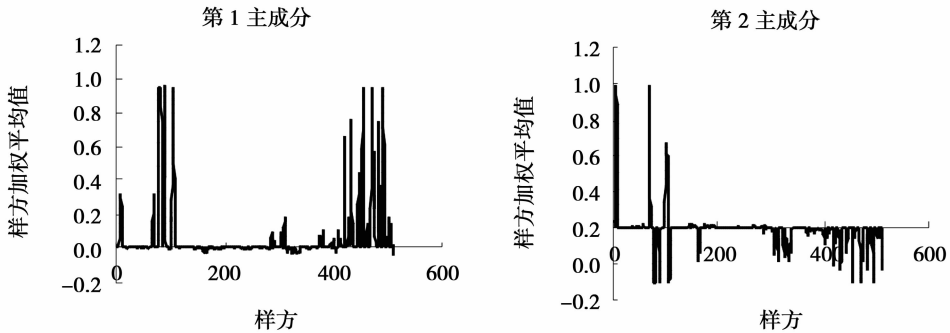


图2 黄灌区外围半固定油蒿群落样带上植被的变化

### 2.4 井灌区外围半固定油蒿群落格局的特点

2.4.1 多种群格局的特点 根据协方差和矩阵的主成分分析,选取前3个主成分,解释的植被信息量分别为54.80%、28.38%、15.40%。

从图3看出:第1主成分的区组方差图在区组5、69和116处明显出现有3个峰值,说明在峰值处存在格局,斑块长度分别为2.5、34.5、58.0 m;第2主成分在区组39、193和252处存在长度为18.5、96.5、126.0 m的斑块;第3主成分在区组20、118、182处存在长度为10.0、59.0、91.0 m的斑块。

从图3看出:在第1主成分解释的格局内,区组69处的斑块占有较高的植被信息量,强度为0.0580,一致性为0.3446;其次为区组116、5处的斑块,强度为0.1159、0.0414,一致性为0.6887、0.2460。这个类型的斑块,以沙冬青为主,贡献率高达0.9115,其它植物种贡献率较低。沙冬青与大多数植物种表现出微弱负关联(油蒿除外)。

第2主成分解释的格局内,区组39处的斑块占有较高的植被信息量,强度为0.0690,一致性为0.4099;其次为区组252、193尺度,强度为0.0211、0.0215,一致性为0.1254、0.1281。这个类型斑块成白刺、油蒿多种群格局,其中白刺为主(贡献率0.5225)、油蒿为辅(贡献率0.3469);其它植物种在斑块中数量较少;白刺与油蒿表现出较强的负关联(表3向量得分),与沙米、沙冬青表现出一定的正关联。

第3主成分解释的格局内,区组20处的斑块占有较高的植被信息量,强度为0.0812,一致性为0.4817;其次为区组182、118处斑块,强度为0.0226、0.0270,一致性为0.1341、0.1602。在这个类型的斑块内,呈现以油蒿为主(贡献率0.6218)、白刺为辅(0.3190)的多种群格局,并且油蒿与白刺成较强的正关联;其它植物对斑块的贡献率较低,其中油蒿与沙米表现出相对强的正关联。

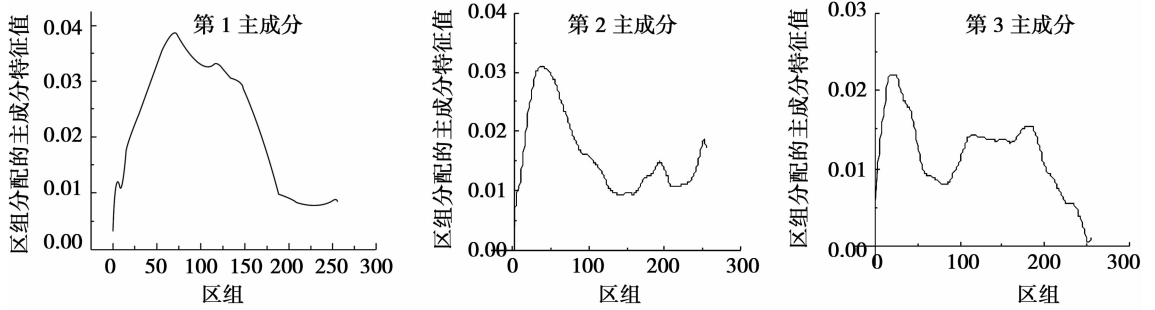


图3 井灌区外围半固定油蒿群落主成分区组方差图

表3 井灌区外围半固定油蒿群落多种群格局内植物种的向量得分和贡献率

| 植物名 | 向量得分     |          |          | 贡献率     |         |         |
|-----|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
|     | 第1主成分    | 第2主成分    | 第3主成分    | 第1主成分   | 第2主成分   | 第3主成分   |
| 油蒿  | 0.121 9  | -0.589 0 | 0.788 5  | 0.014 9 | 0.346 9 | 0.621 8 |
| 籽蒿  | -0.131 0 | 0.056 0  | -0.077 7 | 0.017 2 | 0.003 1 | 0.006 0 |
| 白刺  | -0.012 0 | 0.722 8  | 0.564 8  | 0.000 1 | 0.522 5 | 0.319 0 |
| 沙冬青 | 0.954 7  | 0.169 6  | -0.051 0 | 0.911 5 | 0.028 8 | 0.002 6 |
| 沙米  | -0.236 6 | 0.312 6  | 0.215 1  | 0.056 0 | 0.097 7 | 0.046 2 |
| 沙竹  | -0.004 1 | 0.006 5  | 0.001 2  | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| 五星蒿 | -0.014 8 | 0.007 4  | 0.009 5  | 0.000 2 | 0.000 1 | 0.000 1 |
| 猪毛菜 | -0.009 7 | -0.002 6 | -0.008 9 | 0.000 1 | 0.000 0 | 0.000 1 |
| 薊   | -0.000 5 | 0.000 0  | -0.001 3 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| 虫实  | -0.000 6 | -0.029 1 | -0.064 8 | 0.000 0 | 0.000 8 | 0.004 2 |

2.4.2 样带上植被的变化 将图4与表3相结合可以看出:第1主成分中加权平均值较高的样方以沙冬青为主,接近零的样方以草本植物虫实、薊、猪毛菜、五星蒿、沙竹、沙米,灌木植物白刺、籽蒿、油蒿,或空样方为主。第2主成分中得分最高的以白

刺、沙米为主;得分最低的以油蒿为主;接近零分的以薊、虫实、猪毛菜、五星蒿、沙竹、籽蒿或空样方为主。第3主成分得分最高的以油蒿、白刺为主;较高的以沙米为主,接近0的以薊、沙竹、虫实、猪毛菜、五星蒿、沙冬青、籽蒿或空样方为主。

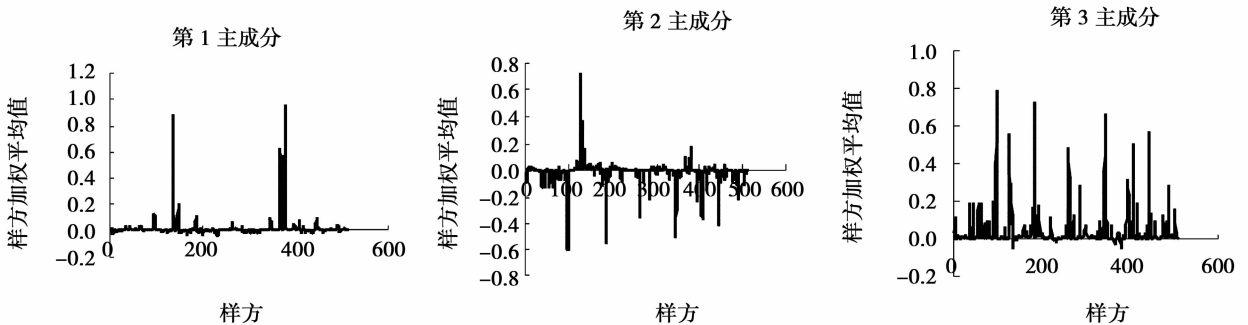


图4 井灌区外围半固定油蒿群落样带上植被的变化

### 3 结论与讨论

对比2个油蒿群落的植物盖度及植物种重要值可以看出,虽然2个群落的植被平均盖度有所不同(黄灌区高于井灌区),但油蒿在2个群落中重要性

都最高,重要值分别为45.26%、47.41%,2个群落都为典型油蒿群落;但从植物种对植被格局的贡献率来看,油蒿对这2个群落格局的贡献率却显著不同。黄灌区,83.84%的植被为油蒿单种群格局,油蒿对格局的贡献率高达0.8896。井灌区,54.80%

的植被基本为沙冬青单种群格局,沙冬青对格局的贡献率为 0.911 5;28.38% 的植被以白刺为主、油蒿为辅的多种群格局,白刺、油蒿的贡献率分别为 0.522 5,0.346 7;15.54% 的植被以油蒿为主、白刺为辅的多种群格局,油蒿、白刺的贡献率分别为 0.621 8,0.319 0。可以看出:在井灌区,虽然油蒿在群落中的重要值仍最高,但在格局中,贡献率却出现了明显下降。

对 2 个油蒿群落格局特点进行对比发现:黄灌区存在 6 个不同尺度的植被格局,而井灌区则存在 9 个,可见在井灌区,油蒿群落植被的斑块化现象更严重一些。对比 2 区段以油蒿为主的植被格局强度(即黄灌区第 1 主成分和井灌区第 3 主成分解释的植被格局),发现在尺度相近的格局上,黄灌区的格局强度高于井灌区。格局强度一般指的是斑块盖度与间隙的差异性<sup>[19]</sup>,在沙区,斑块间隙常以流沙或稀疏草本植物为主,应用完全格局的理论,格局强度可以间接反应出斑块内的植被盖度。由此可见,黄灌区油蒿斑块内的植被盖度要大于井灌区。据此可以推测:如果未来由于干旱,黄河供水量减少,绿洲外围地下水位出现下降,在油蒿群落特点未发生明显变化条件下,群落内植被格局特点会首先出现变化,即斑块分化现象会加重,斑块内的植被盖度会首先出现下降,并且不同植物种的贡献率也会首先在斑块内出现改变。

### 参 考 文 献:

- [1] Liebholt A M, Rossi R E, Kemp W P. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology [J]. *Annual Review of Entomology*, 1993, 38:303 - 327
- [2] Wiens J A. Spatial scaling in ecology [J]. *Functional Ecology*, 1989, 4(3):385 - 397
- [3] Dungan J L, Perry, J N, Dale M R T, *et al.* A balanced view of scale in spatial statistical analysis [J]. *Ecography*, 2002, 25: 626

-640

- [4] Perry J N, Liebholt A M, Rosenberg M S, *et al.* Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data [J]. *Ecography*, 2002, 25:578 - 600
- [5] Fortin M J, Dale M R T, Ver Hoef J M. Spatial analysis in ecology [R]//EI-Shaarawi A H, Piegorisch W W. *Encyclopedia of Environmental Metrics*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2002:2051 - 2058
- [6] Legendre P, Legendre L. *Numerical ecology* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1998
- [7] Fortin M J, Dale M R T. *Spatial analysis: a guide for ecologists* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [8] 尚玉昌. 普通生态学[M]. 北京:北京大学出版社, 2002
- [9] Noy-Meir I, Anderson D J. Multiple pattern analysis or multiscale ordination: Towards a vegetation hologram? [M]//Patil G P, Pielou E C, Water W E. *Statistical Ecology*. University Park: Pennsylvania State University Press, 1971
- [10] Ver Hoef J M, Glenn - Lewin D C. Multiscale ordination: A method for detecting pattern at several scales [J]. *Vegetatio*, 1989, 82: 59 - 67
- [11] Dale M R T, Zbigniewicz M W. The evaluation of multispecies pattern [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1995, 6: 391 - 398
- [12] 李慧勇, 李慧卿, 李清河, 等. 几种人工固沙林多种群多尺度格局及种间关联[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(4):741 - 746
- [13] 李慧卿, 李慧勇, 张景波, 等. 绿洲外围沙冬青群落多种群多尺度格局特点研究[J]. *林业科学*, 2006, 42(5):1 - 5
- [14] 李慧卿, 赵秀莲, 张景波, 等. 乌兰布和沙漠东北缘不同灌溉模式绿洲外围半固定白刺群落格局研究[J]. *林业科学研究*, 2005, 18(2):158 - 162
- [15] 马风云, 李新荣, 龙利群, 等. 沙坡头地区人工植被油蒿种群结构与更新的研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(6):571 - 575
- [16] 杨洪晓, 张金屯, 吴 波. 毛乌素沙地油蒿种群格局分析[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(4):563 - 570
- [17] 杨洪晓, 张金屯, 李振东, 等. 毛乌素沙地油蒿种群空间格局对比[J]. *生态学报*, 2008, 28(5):1901 - 1910
- [18] 刘凤红, 刘 建, 董 鸣. 鄂尔多斯高原沙地植被和两种优势克隆半灌木的空间格局[J]. *生态学报*, 2004, 14(11):2374 - 2381
- [19] Dale M R T. *Spatial pattern analysis in plant ecology* [M]. Cambridge: Cambridge university press, 1999