

斑块尺度湿地植物群落多样性的维持能力*

孙贤斌^{1,2,*} 刘红玉¹ 张晓红¹ 胡俊纳¹

(¹ 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; ² 皖西学院城市建设与环境系, 安徽六安 237012)

摘要 基于GIS技术和主成分分析方法,对1950、1967、1983和2000年挠力河流域湿地景观斑块特征与斑块内植物群落多样性之间的关系进行了研究.结果表明:1950—2000年间,研究区湿地斑块平均面积逐渐减小,能够维持2种及2种以上植物群落的斑块数量逐渐减少,最小斑块面积为10.1 km².湿地斑块面积与植物群落多样性指数和群落类型数均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),湿地斑块面积越大,维持植物群落多样性的能力越强.随着湿地斑块面积的逐渐减小,斑块破碎化指数和分维数逐渐增大,形状指数和斑块内植物群落多样性指数逐渐减小.随着湿地斑块空间分离度的增大,斑块内植物群落多样性指数呈减小趋势.主成分分析结果显示,研究区湿地斑块面积大小是影响斑块内群落多样性的最重要因素,其次为斑块的破碎化程度和分离度.

关键词 湿地 斑块 植物群落多样性 维持能力 挠力河流域

文章编号 1001-9332(2009)03-0579-07 **中图分类号** Q149 **文献标识码** A

Maintenance capacity of plant community diversity of wetlands in patch scale. SUN Xian-bin^{1,2}, LIU Hong-yu¹, ZHANG Xiao-hong¹, HU Jun-na¹ (¹ College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; ² Department of Urban Development and Environmental Sciences, Wanxi University, Lu'an 237012, Anhui, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20(3): 579-585.

Abstract : Based on GIS and principal component analysis method, this paper analyzed the relationships between the patch characteristics and the plant community diversity in the patches of wetlands in Naoli River Watershed in 1950, 1967, 1983 and 2000. The results showed that in 1950-2000, the average patch size of the wetlands and the number of the patches that had the capacity of maintaining more than two types of wetland plant community decreased dramatically, and the minimum patch size was 10.1 km². Both the plant community diversity index and the number of plant community types had significant positive correlations with the patch size of the wetlands. The larger the patch size, the higher maintenance capacity of plant community diversity. With the decrease of patch size, the patch fragmentation index and patch fragmental dimension increased, while the patch shape index and the plant community diversity index in the patches decreased. With the increase of patch spatial separation, the plant community diversity index in the patches decreased. Principal component analysis indicated that patch size was the most important factor affecting the plant community diversity of wetlands, followed by patch fragmentation and separation.

Key words : wetland; patch; plant community diversity; maintenance capacity; Naoli River Watershed.

景观空间格局、景观异质性是景观生态学的重点研究领域^[1-2]. 斑块是景观中最重要也是最基本的组成单元,许多空间格局和生态过程都由斑块和斑块动态所决定^[3]. 斑块的类型、面积大小、形状、

数量和组合关系是斑块的主要特征,这些斑块特征对景观结构、景观格局、景观多样性、景观异质性以及生态流、生物多样性等各种生态过程和现象具有深刻的影响^[4-6]. 准确掌握景观中斑块的大小及分布规律,可为景观水平的生物多样性保护提供理论依据^[7].

斑块尺度上植物群落结构的形成与维持是植物

* 国家自然科学基金项目(40871084)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070319001)资助.

** 通讯作者. E-mail: sunxb98@126.com

2008-08-25 收稿, 2008-12-22 接受.

群落及其物种多样性持续发展的基础,其驱动力源于外界干扰,干扰导致新的异质性生境和各个处于不同发育阶段的群落斑块的形成^[8-9]。随着“3S”空间研究技术的迅速发展,在较大的空间尺度上,运用景观生态学原理研究区域植物群落景观多样性及其时空变化对理解和分析群落特征具有重要意义^[10]。目前,相关领域的研究主要集中于景观多样性和物种多样性方面,对斑块尺度的景观变化及其对植物群落多样性影响的报道则较少^[11-16]。三江平原挠力河流域属于山区-平原型流域,流域中下游的平原区域地势平坦,主要地貌类型为高低河漫滩,发育有大面积的湿地,且湿地景观类型丰富。为此,本文选择挠力河流域中下游地貌和水文梯度等因素基本一致的区域^[17]为研究区域,探讨了斑块尺度上湿地植物群落的结构变化及影响因素,分析了研究区湿地景观斑块特征及其与植物群落多样性的关系,以期为更好地保护湿地资源及植物群落多样性提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

挠力河流域地处黑龙江省三江平原腹地(45°43′—47°35′N,131°3′—134°10′E),总面积24167 km²,流域内平原面积占65%、山区占35%。挠力河是乌苏里江的主要支流,自西南流向东北,全长596 km。研究区属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,年均降水量520 mm,冬春季降水少,夏季降雨丰富,6—9月降水量占全年降水量的70%以上,全年低温期长、蒸发量小,有利于沼泽湿地的形成和发育。该区地势低平、地表径流不畅,而且广泛分布的粘性土层阻碍地表水下渗,形成大面积沼泽。独特的自然环境和气候条件,使该区具有丰富的湿地类型。新中国成立以来,随着人口的增加和经济的迅速发展,经过4次大规模农业开发活动后,研究区大面积的湿地已转化为农田(目前,湿地仅占整个流域面积的7.1%、占平原面积的11%),该区已成为三江平原主要产粮区和国家重要商品粮基地,现有6个县和7个现代化农场。

1.2 数据来源及预处理

利用GIS技术对挠力河流域1950年(1935年航空调查,1945年编制的1:10万地形图)、1965年(20世纪60年代测绘编制的1:20万地形图,参考同期土地调查图件)、1983年(中国科学院长春地理研究所编制的1:20万湿地植被图)图件进行景观制图,利用2000年TM/ETM遥感影像数据进行人

工解译并结合野外调查编制了研究区湿地景观现状图。为使上述数据精度可靠、真实反映不同时期湿地景观和土地利用状况,制图中采用相同的景观分类系统、相同的地图投影和最小制图单元^[11,17-19]。湿地景观分类最小单元为16种植物群落类型,将植物群落类型单元合并可获得4类湿地景观,湿地景观和植物群落分类系统参见文献^[11,19]。由于该区初期土地开发活动较弱,比较粗略的数据就可以反映初期植物群落和景观特点,而2000年土地开发强度较大,需较精细的数据才能揭示土地开发特征。数据精度及其检验过程参见文献^[19]。

以1950、1967、1983和2000年研究区湿地景观和植物群落类型数据为基础,将湿地景观图层与植物群落类型图层叠加,利用ArcView 3.2提取各时段每个景观斑块内所对应的湿地植物群落斑块,统计斑块内植物群落的类型数和每种类型占据的面积。为了揭示斑块对植物群落的维持能力,提取斑块内至少包含2种以上(含2种)植物群落类型。

1.3 研究方法

本文选取植物群落多样性指数、斑块特征指数(形状指数、破碎化指数、分维数)和分离度指数分析湿地斑块维持植物群落多样性的影响因素。这五个景观指数既相互独立,又可比较全面地描述景观格局^[20-21]。

1.3.1 植物群落多样性指数(H) 斑块内植物群落的多样性采用下式计算^[11]:

$$H = - \sum_{k=1}^n P_k \ln(P_k)$$

式中: P_k 为第 k 类植物群落占该湿地斑块的面积比; n 为湿地斑块内植物群落的类型数。

1.3.2 斑块特征指数 采用斑块形状指数(PSI)、斑块分维数(F_d)以及斑块内部生境的破碎化指数(FI_2)表示斑块形状变化^[3,19,22]。

$$PSI = E/4\sqrt{A}$$
$$F_d = 2\ln(Z/4)/\ln A$$
$$FI_2 = 1 - A_1/A$$

式中: E 为湿地斑块边界的总长度(km); A 为湿地斑块面积(km²); Z 为斑块周长(km), $Z = kA^{F/2}$, k 为常数(取4); F_d 为分维数; A_1 为该斑块类型中最大斑块面积(km²)。当斑块形状不规则或偏离正方形时, PSI 越大,反之, PSI 越小。 $1 \leq F_d \leq 2$, F_d 值越大,反映斑块形状越复杂,当 $F_d = 1$ 时,则斑块形状为欧氏正方形。

1.3.3 斑块分离度指数(S_k) 斑块分离度指数的计算公式如下^[23]:

$S_k = P_k/B_k$ $P_k = \sqrt{N_k/A}/2$ $B_k = A_k/A$

式中： A_k 、 A 分别为第 k 个湿地的斑块面积和湿地总面积 (km^2)； N_k 为第 k 个湿地斑块内的植物群落数。 S_k 值越大，表明植物群落类型在地域内的分布越分散。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 计算植物群落多样性指数以及相关的景观斑块特征指数。基于统计分析软件 SPSS 12.0，采用主成分分析法分析湿地斑块的面积、形状特征指数和空间分离度对维持斑块植物群落多样性的影响，并进行指数间的 Pearson 相关系数计算和相关性检验，具体步骤参见文献 [24–25]。

2 结果与分析

2.1 湿地景观斑块的时空动态

挠力河流域湿地景观类型主要包括沼泽、湿草甸、灌丛湿地和森林沼泽。沼泽和湿草甸是流域内主要的湿地景观类型，其不仅分布面积大，而且包含的植物群落类型丰富，两者分别包括 9 种和 5 种植物群落类型。1950—2000 年间，随着农业开发的持续影响，研究区湿地景观面积逐渐减少，湿地总面积减少了 87.6%，斑块逐渐破碎化，斑块数量急剧增加，由 511 块增为 2866 块。挠力河流域湿地景观的这种变化主要表现为最大斑块逐渐瓦解的破碎化过程。研究期间，研究区湿地最大斑块面积由 1950 年的

1455.1 km^2 减少为 1967 年的 881.6 km^2 ，再到 1983 年的 635.0 km^2 和 2000 年的 139.8 km^2 ，期间面积减少了 90%，同时，斑块平均面积也由 27.2 km^2 降低到 0.6 km^2 ，减少了 98%。可见，研究区湿地景观的破碎化呈极其严重态势，这必将对该区湿地植物群落多样性的维持产生重要影响（图 1）。

2.2 斑块尺度上湿地景观的植物群落多样性

基于研究区 4 个时段的湿地景观和植物群落类型数据，共提取 59 个湿地斑块（每个斑块至少包含 2 种植物群落类型）。其中，1950、1967 年的湿地景观破碎化不明显，分别提取 26 和 25 个斑块，而 1983 和 2000 年的湿地景观则处于严重破碎化状态，能维持 2 种以上植物群落的湿地斑块数量较少，分别为 5 个和 3 个。

研究期间，维持植物群落多样性的湿地斑块平均面积逐渐减少。1950、1967 年，研究区湿地基本处于连续完整状态，维持 2 种以上植物群落多样性的平均斑块面积分别为 324.8 和 211.2 km^2 ；1983 和 2000 年，湿地景观破碎化的结果导致维持植物群落多样性的斑块平均面积分别为 70.7 km^2 和 31.3 km^2 。同时，维持植物群落多样性的最小斑块面积却呈逐渐增大趋势，由 1950 年的 10.1 km^2 上升至 1967 年的 10.4 km^2 ，又到 1983 年的 14.3 km^2 、2000 年

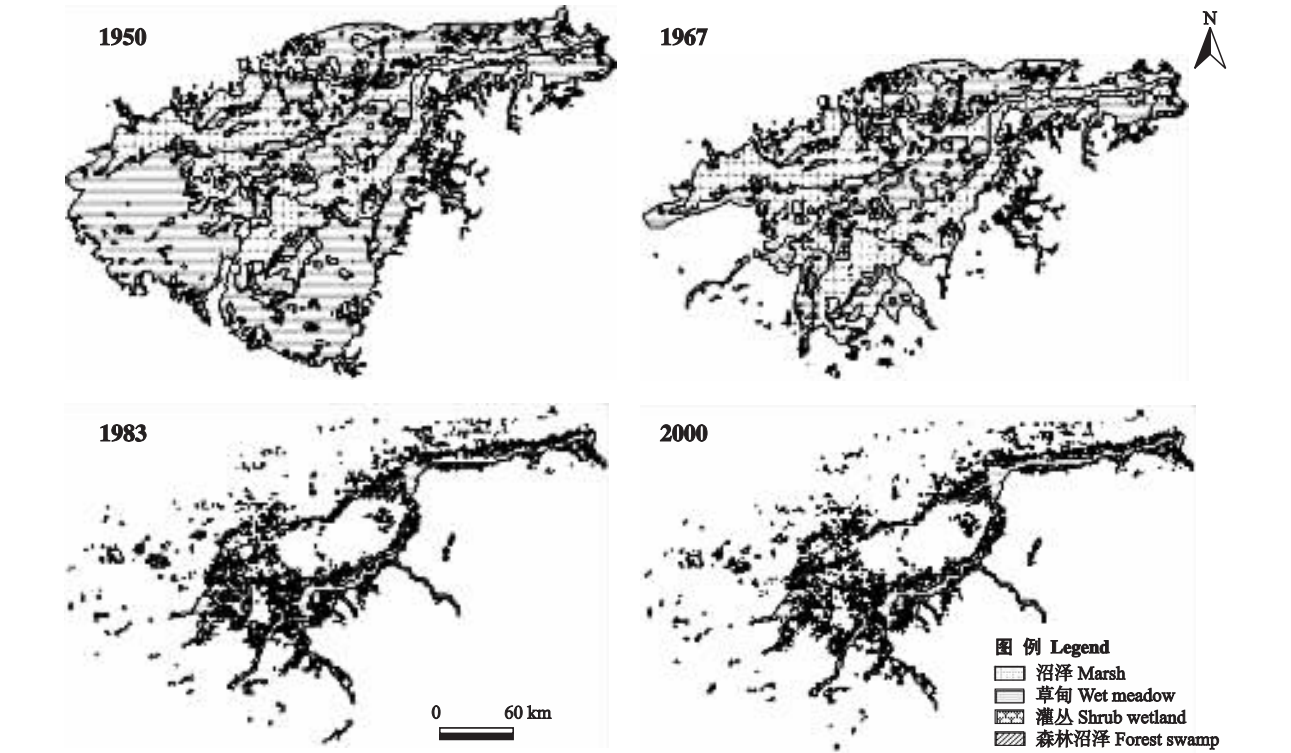


图1 挠力河流域湿地斑块的破碎化
Fig.1 Fragmentation of wetland patch in Naoli River Watershed.

的 17.6 km². 可见,随着挠力河流域湿地景观斑块的破碎化,维持植物群落多样性的平均斑块面积逐渐减小、最小斑块面积逐渐增大,说明在破碎化的湿地景观中,需要较大斑块面积才能维持植物群落的多样性.

2.3 湿地景观斑块变化对植物群落多样性的影响

2.3.1 斑块面积 1950—2000 年间,研究区湿地斑块面积与斑块内的植物群落多样性指数、植物群落类型数均呈极显著线性相关($P < 0.01$,图 2).说明随着挠力河湿地斑块面积的减小,斑块内植物群落多样性指数(由 1.151 减为 0.208)和植物群落类型数(由 7 减为 2)均呈减小趋势.

1950 年,研究区湿地最大斑块面积为 1455.1 km²,其维持的植物群落多样性指数为 1.151,群落类型数为 7 种;2000 年,最大斑块面积为 139.8 km²,其维持的植物群落多样性指数为 0.208,群落类型数为 2.同时,不能维持植物群落多样性的斑块数量达 99.9%,平均斑块面积为 0.52 km².

2.3.2 斑块形状 由图 3 可以看出,随着研究区湿地斑块形状指数由 1.94 增为 11.9,植物群落的多样性指数呈增加趋势(由 0.208 增为 1.151),两者的相关系数为 0.767($P < 0.05$),说明斑块形状对植物群落的扩散至关重要.由于部分物种在斑块内部和边缘的分布不同,而斑块形状影响斑块内部和边

缘的面积大小,使斑块内部和边缘的植物物种和群落多样性存在较大差异,因此,斑块形状对植物群落多样性的维持产生重要影响.

随着研究区斑块内部生境面积破碎化指数的增大,斑块内植物群落多样性指数呈减小趋势,两者呈显著负相关关系($P < 0.05$),相关系数为 -0.785 .研究区 99% 的湿地斑块的破碎化指数大于 0.936,说明挠力河流域湿地斑块的破碎化程度很高.由于农业开垦活动逐步将湿地分割,自然廊道被切断,从而影响了植物群落的物种流通,导致湿地生态功能不断丧失,使湿地斑块内植物群落多样性的维持能力不断降低.

随着研究区斑块分维数的逐渐增大,植物群落多样性指数的变化很小.斑块分维数与植物群落多样性指数之间的相关系数为 -0.111 ,关系不显著.

2.3.3 斑块空间分离度 随着研究区湿地斑块分离度的逐渐增大,植物群落多样性指数呈波动式减小,两者呈显著负相关关系($P < 0.05$),相关系数为 -0.458 .研究期间,挠力河流域湿地斑块分离度指数在 0.11 ~ 5.21,波动较大.湿地斑块分离度较大,说明湿地斑块在空间上常呈孤立状态,被其他类型斑块所隔离,各湿地斑块之间的联系很少,导致斑块维持植物群落多样性的能力降低.

2.4 湿地斑块植物群落多样性影响因子的主成分分析

研究区湿地斑块对植物群落多样性的维持取决于斑块的特征指数和空间关系.为了区分斑块面积、斑块特征和分离度对维持植物群落多样性的贡献大小,通过计算变量方差和协方差矩阵的特征量,以影响斑块植物群落多样性的因素为变量进行主成分识别.为了用较少的指标反映尽量多的信息,以相关矩阵的特征值 ≥ 1 为标准^[25],选取前 3 个因子作为主成分.由表 1 可以看出,第 1、第 2 和第 3 主成分(分别为 C_1 、 C_2 、 C_3)的累积贡献率大于 96%,可以作为主要的影响因素指标.其中,第 1 主成分以斑块面积

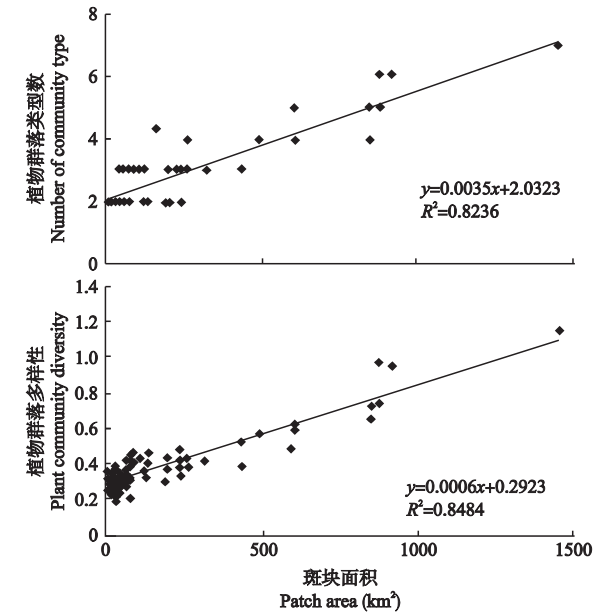


图 2 研究区湿地斑块面积与植物群落类型数和植物多样性指数的关系

Fig. 2 Relationship of wetland patch area with number of plant community type and plant community diversity in the study area.

| 表 1 主成分的特征值及贡献率 Tab. 1 Eigenvalue and contribution of principal components | | | |
|---|-------------------|--------------------------------|---|
| 主成分 Principal component | 特征值 Eigenvalue | 贡献率 Contribution rate (%) | 累计贡献率 Accumulative contribution rate (%) |
| C_1 | 2.904 | 50.294 | 50.294 |
| C_2 | 1.541 | 26.689 | 76.983 |
| C_3 | 1.129 | 19.553 | 96.536 |

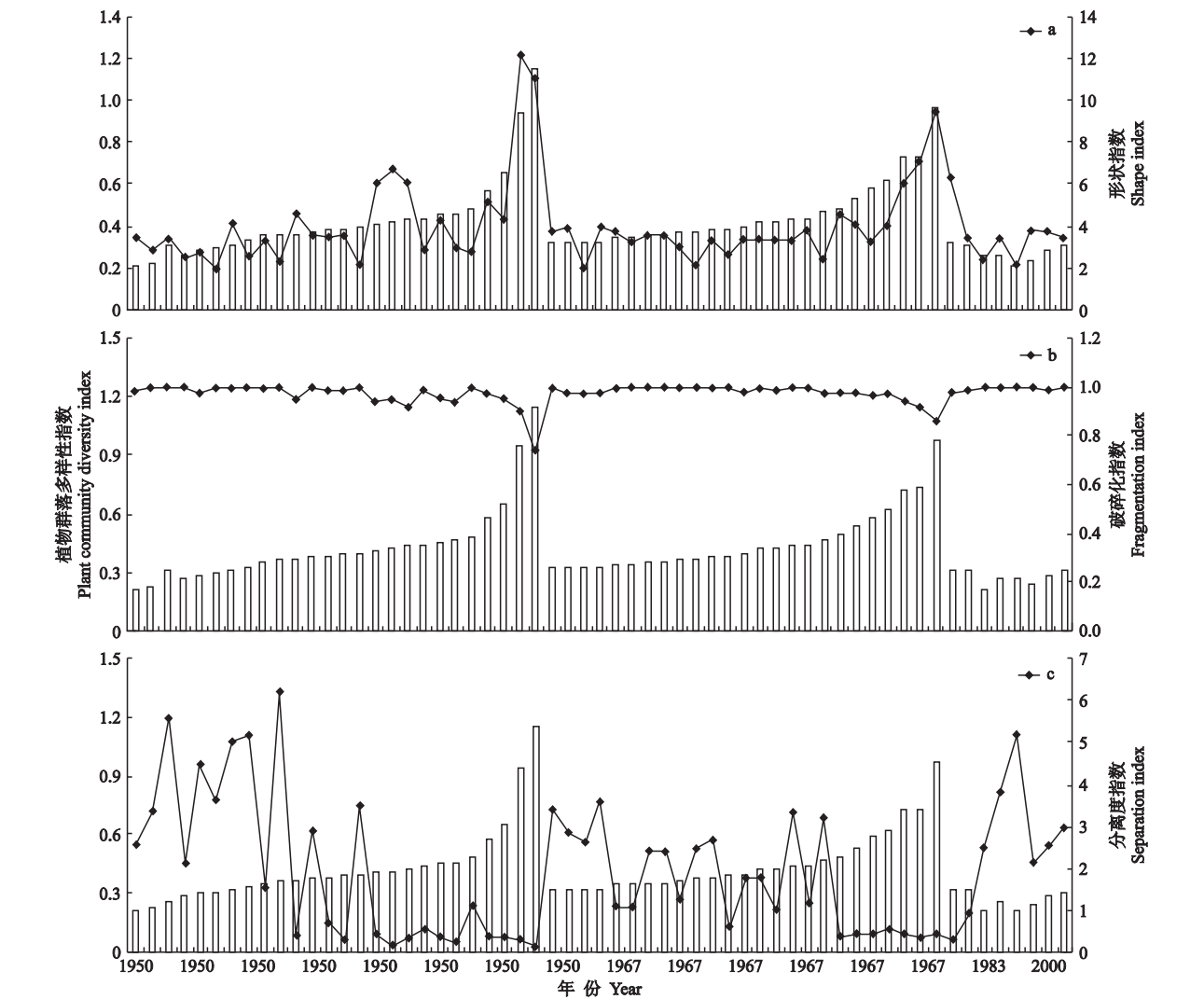


图 3 研究区湿地斑块的形状指数 (a)、破碎化指数 (b)和分离度指数 (c)与植物群落多样性指数的关系
Fig.3 Relationship of wetland patch shape index (a) , fragmentation index (b) , separation index (c) and diversity index of plant community in the study area.

和破碎化指数的贡献最大 ,前者的增大有利于植物群落多样性的增加 ,而后者的作用则相反 ,第 2 主成分以斑块形状指数的贡献最大 ,第3主成分以分离

度的贡献最大(表 2).

3 结 论

随着研究区湿地斑块的破碎化 ,维持 2 种以上植物群落的最小湿地斑块面积逐渐增大 ,平均斑块面积逐渐减小. 所以 ,湿地斑块面积是挠力河流域湿地维持植物群落多样性能力的最基本条件 ,也是最重要的影响因素.

斑块形状、破碎化、分离度均对植物群落多样性的维持发挥着显著作用. 斑块形状指数越大 ,越有利于植物群落多样性的维持 ,破碎化指数、分离度指数则相反. 因此 ,湿地斑块特征及其空间位置也显著影响研究区植物群落多样性的维持.

斑块的面积、形状和分离度对植物群落多样性

表 2 主成分载荷矩阵
Tab.2 Matrix of principal components

| 指 标 Index | 主成分载荷 Component matrix | | | 旋转后主成分载荷 Rotated component matrix | | |
|------------------------------|---------------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|----------------|----------------|
| | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₁ | C ₂ | C ₃ |
| 面积 Area | 0.928 | 0.112 | 0.342 | 0.978 | -0.053 | -0.170 |
| 分维数 Fractal dimension | 0.110 | 0.256 | -0.223 | 0.125 | 0.171 | 0.054 |
| 破碎化指数 Fragmentation index | -0.939 | -0.105 | -0.321 | -0.957 | 0.151 | 0.194 |
| 分离度指数 Separation index | -0.701 | 0.299 | 0.671 | -0.236 | 0.148 | 0.938 |
| 形状指数 Patch shape index | 0.804 | 0.781 | -0.183 | 0.704 | 0.801 | -0.442 |

的维持和影响存在较大差异. 维持斑块植物群落多样性的主导因素包括斑块面积、破碎度和分离度, 且作用依次减小.

通过统计分析发现, 1983 年前后, 研究区湿地斑块破碎化最明显, 1950、1967 年湿地斑块与植物群落多样性极其相似, 而 1983 和 2000 年的有效湿地斑块(能维持 2 种以上植物群落的斑块)数目有限, 因此, 难以分时段进行对比分析. 由于湿地斑块特征指数的计算与景观栅格大小有关^[26-27], 今后需对不同栅格单元条件下的斑块植物群落多样性维持能力作进一步定量分析. 另外, 土地利用强度、湿地排水等人类活动干扰存在空间差异, 对植物群落多样性的维持能力也产生一定影响, 需对不同区域湿地斑块植物群落多样性的维持能力进行深入探讨^[28].

参考文献

- [1] Chang X-L (常学礼), Wu J-G (邬建国). Spatial analysis of pattern of sand landscapes in Kerqin, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1998, **18**(3): 225-232 (in Chinese)
- [2] Zhao Y-T (赵玉涛), Yu X-X (余新晓), Guan W-B (关文彬). Review on landscape heterogeneity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(4): 495-500 (in Chinese)
- [3] Fu B-J (傅伯杰), Chen L-D (陈利顶), Ma K-M (马克明), et al. Principle and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
- [4] Guo Q-X (国庆喜). Characteristics of canopy patches related to natural regeneration of broad leaved Korean pine forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(12): 1541-1543 (in Chinese)
- [5] Liu H-Y (刘红玉), Lü X-G (吕宪国), Zhang S-K (张世奎), et al. Fragmentation process of wetland landscape in watersheds of Sanjiang Plain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(2): 289-295 (in Chinese)
- [6] Hatfield RG, LeBuhn G. Patch and landscape factors shape community assemblage of bumble bees, *Bombus* spp. (Hymenoptera: Apidae), in montane meadows. *Biological Conservation*, 2007, **139**: 150-158
- [7] Li X-W (李晓文), Hu Y-M (胡远满), Xiao D-N (肖笃宁). Landscape ecology and biodiversity conservation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(3): 399-407 (in Chinese)
- [8] Ye W-H (叶万辉). The maintenance mechanism of plant community and its species diversity. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2000, **8**(1): 17-24 (in Chinese)
- [9] Hendrickx F, Maelfait JP, Van Wingerden W, et al. How landscape structure, land-use intensity and habitat diversity affect components of total arthropod diversity in agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 2007, **44**: 340-351
- [10] Foody GF, Lucas RM, Curran PJ, et al. Mapping tropical fractional cover from coarse spatial resolution remote sensing imagery. *Plant Ecology*, 1997, **131**: 143-154
- [11] Liu H-Y (刘红玉), Lü X-G (吕宪国), Zhang S-K (张世奎), et al. Landscape biodiversity of wetlands and their changes in 50 years in watersheds of the Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(7): 1472-1479 (in Chinese)
- [12] Shang W-Y (尚文艳), Wu G (吴钢), Fu X (付晓), et al. Maintaining mechanism of species diversity of land plant communities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(3): 573-578 (in Chinese)
- [13] Hernández-Stefanoni JL, Dupuy JM. Effects of landscape patterns on species density and abundance of trees in a tropical sub-deciduous forest of the Yucatan Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**: 3797-3805
- [14] Chen J, Huang DM, Shiyomi M, et al. Spatial heterogeneity and diversity of vegetation at the landscape level in Inner Mongolia, China, with special reference to water resources. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **82**: 222-232
- [15] Deng W-H (邓文洪), Gao W (高玮), Song X-D (宋晓东). Effect of forest patch size and isolation on reproductive success of Great Tit in fragmented secondary-forests. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(4): 527-531 (in Chinese)
- [16] Zheng J-W (郑家文), Ding P (丁平), Xu X-J (徐肖江), et al. Effects of habitat patch on *Lophura nycthemera* population. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(5): 951-953 (in Chinese)
- [17] Liu H-Y (刘红玉), Zhang S-K (张世奎), Lü X-G (吕宪国). Wetland landscape structure and the spatial-temporal changes in 50 years in the Sanjiang Plain. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2004, **59**(3): 391-400 (in Chinese)
- [18] Liu H-Y (刘红玉), Lü X-G (吕宪国), Zhang S-K (张世奎), et al. Fragmentation process of wetland landscape in watersheds of Sanjiang Plain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(2): 289-295 (in Chinese)

- [19] Liu H-Y (刘红玉). Wetland Landscape Changes and Environmental Effects. Beijing : Science Press , 2005 (in Chinese)
- [20] Riitters KH , O ' Neill RV , Hunsaker CT , *et al.* A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology* , 1995 , **10** : 23-39
- [21] Chen W-B (陈文波) , Xiao D-N (肖笃宁) , Li X-Z (李秀珍). Classification , application , and creation of landscape indices. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 2002 , **13**(1) : 121-125 (in Chinese)
- [22] Chang X-L (常学礼) , Lu C-X (鲁春霞) , Gao Y-B (高玉葆) , *et al.* Analysis of landscape patch structure influence on desertification process of Kerqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报) , 2004 , **24** (6) : 1237-1242 (in Chinese)
- [23] Ye Y-Q (叶延琼) , Chen G-J (陈国阶). An analysis on the landscape patterns based on the GIS technology in the upper Min River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境) , 2006 , **15**(1) : 112-115 (in Chinese)
- [24] Lu W-D (卢纹岱). SPSS for Windows Statistical and Analysis Study. Beijing : Electronics Industry Press , 2002 (in Chinese)
- [25] Gao J-X (高吉喜) , Duan F-Z (段飞舟) , Xiang B (香 宝). The application of principal component analysis to agriculture soil contamination assessment. *Geographical Research* (地理研究) , 2006 , **25**(5) : 836-842 (in Chinese)
- [26] Cai J-A (蔡建安) , Zhang W-Y (张文艺). Assessment of Environmental Quality and System Analysis. Hefei : Hefei University of Technology Press , 2002 (in Chinese)
- [27] Yue W-Z (岳文泽) , Xu J-H (徐建华) , Xu L-H (徐丽华) , *et al.* Spatial variance characters of urban synthesis pattern indices at different scales. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 2005 , **16**(11) : 2053-2059 (in Chinese)
- [28] Guo Z-H (郭志华) , Zang R-G (臧润国) , Jiang Y-X (蒋有绪). The formation and maintenance mechanism of biodiversity and the research techniques for biodiversity. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学) , 2002 , **38**(6) : 116-124 (in Chinese)

作者简介 孙贤斌,男,1970 生,博士研究生.主要从事景观生态与 GIS 应用研究,发表论文 13 篇. E-mail : sunxb98@126.com

责任编辑 杨 弘
