

科尔沁沙地景观斑块结构对沙漠化过程影响分析

常学礼^{1,2}, 鲁春霞³, 高玉葆¹, 曹艳英²

(1. 南开大学生命科学学院, 天津 300071; 2. 烟台师范学院地理与旅游系, 山东 烟台 264025;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:采用 RS 和 GIS 技术对科尔沁沙地景观斑块结构对沙漠化的影响进行了研究。通过选择固定沙丘斑块、农田斑块和景观中总斑块的数量、平均面积和平均斑块形状等九个因子,分别采用单因子关联分析和多因子 PCA 分析,揭示了科尔沁沙地斑块结构对沙漠化过程的影响。单因子的分析表明,固定沙地斑块数(SN)和平均斑块面积(SA)、农田斑块数(CN)和总斑块数(TN)与沙漠化程度(DG)的关联程度极为显著(在 0.01 水平上),关联系数 >0.921 。各因子与沙漠化程度之间存在回归关系,其中上述 4 个因子与沙漠化程度的关系比较密切,呈线性回归关系,相关系数变化在 0.902~0.991 之间,相互之间具有较高的置信度。PCA 的分析表明,不同类型斑块数量对沙漠化景观的影响最大,其所代表的影响方向(PC1 轴)占有分析因子贡献率的 53.3%;不同类型斑块形状对沙漠化景观的影响次之,其所代表的影响方向(PC2 轴)占有分析因子贡献率的 27.5%。从不同斑块类型对沙漠化的影响特点来看,固定沙丘斑块对沙漠化的发生、发展起正向的影响作用,斑块的各种指数(SN、SA 和 SF)与沙漠化的关系都为正关联。农田斑块对沙漠化的影响作用则较复杂,其中斑块数量(CN)与沙漠化的关系为正关联,而平均斑块面积(CA)和平均形状指数(CF)与沙漠化的关系为负关联。

关键词:景观;斑块结构;沙漠化;关联分析;PCA 分析

Analysis of landscape patch structure influence on desertification process of Kerqin Sandy Land

CHANG Xue-Li^{1, 2}, LU Chun-Xia³, GAO Yu-Bao¹, CAO Yan-Ying² (1. Life Sciences College, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Department of Geography and Tourism, Yantai Normal College, Shandong Yantai 264025, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1237~1242.

Abstract: This study analyzes the effect of landscape patch structure influence upon desertification process by using RS and GIS techniques in Kerqin Sandy Land. Basic image adopt landsat TM image obtained on Sep. 6, 2000. RS and GIS software, such as erdas 8.4, Arcview 3.2, and Arcinfo 7.1, was used as an interpretation tools. Landscape is divided to eight types by means of land use and cover classification method. Analysis data come from samples that are same size and locate at different place on interpreted map. The factors of patch number, average patch area, and average patch shape of fixed sandy land, cropland, and total patch have been employed to judge the effect of patch structure influence upon the desertification process. Due to association and regression analysis of single factor between above mentioned factors and desertification degree (DG) which is quantitative indicator of desertification process, results showed that: (1) there were significant correlation (at 0.01 level) among the patch numbers of fixed sandy land (SN), the average area of total patch (SA), the patch numbers of cropland (CN), the numbers of total patch (TN) and the DG. Their association coefficients were more than 0.921. (2) There were linear regression relations between the DG and all of the factors. (3) However, there were not highest correlations between the factors and the DG only, but had highest correlations among inter-factors. These highlighted that there were complex relations among the DG and the factors that could be directly or indirectly influence upon DG. According to above findings we can

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018607);国家自然科学基金资助项目(49601020)

收稿日期:2003-03-12; **修订日期:**2003-12-10

作者简介:常学礼(1963~),男,博士,教授,主要从事恢复生态学和景观生态学研究。E-mail: xlchang@eyou.com

Foundation item: National Key Basic Research Special Foundation Project (No. G20000018607) and National Natural Science Foundation of China (No. 49601020)

Received date:2003-03-12; **Accepted date:**2003-12-10

Biography: CHANG Xue-Li, Ph. D., Professor, mainly engaged in landscape ecology and restoration ecology. E-mail: xlchang@eyou.com

confirm that the patch structure obviously affects the DG in a synthetic way, so principal component analysis (PCA) becomes a necessary method for best understanding the relation between the patch structure and the DG because it is a useful tool for analyzing multi-factors impact. The PCA results showed that all patch structure effects could be integrated to five vectors for the patch structure influence upon the DG, and total cumulative proportion was 99%. Among of these, the cumulative proportion of the first and the second vectors reached to 80.8% and were main comprehensive factors (vectors). The numbers of different kinds of patches were the major impact factor of desertification process, and its cumulative proportion reached to 53.3% at PC1 axis. The patch shapes were the secondary impact factor of desertification process and its cumulative proportion reached to 27.5% at PC2 axis. In terms of the characteristics of different patch types affecting on the desertification process, the fixed sandy land patches played a positive role for the DG and had a positive correlation between all indices and the DG. The cropland patches played a different role in different ways. First, it brought about a positive correlation between the patch numbers of cropland and the DG. Second, it result in a negative relationship between the average patch areas and the average patch shapes with the DG.

Key words: landscape; patch structure; desertification; association analysis; principal component analysis (PCA).

文章编号:1000-0933(2004)06-1237-06 中图分类号:P208,Q149 文献标识码:A

自从沙漠化(沙质荒漠化)作为一个环境问题受到人们所重视以来,沙漠化的发生发展动因就成为人们关注的焦点之一^[1~3]。从区域角度来看,沙漠化的动因包括两个部分,其一为自然因素,其二为人为因素;自然因素是基础,而人为因素则是诱因^[1,4]。景观作为介于区域和生态系统尺度之间的尺度,具有明确的时空域,即景观的组成要素斑块(Patch)、基质(Matrix)和廊道(Corridor)等有明确的边界,并在时间上发生不断的变化^[5,6]。从沙地景观的特点来看,其特征的形成是自然与人为因素耦合作用的结果^[7~9],其本身具有自然特点和人文特征(如不同地域沙漠化治理中的植物种选用、配置,人工防护林的带、片、网组合等),这也正是早期景观生态学的主要方面之一^[10]。所以,景观在沙漠化研究中具有独特的作用,主要表现在:当自然和人为因素一致的前提下,景观组成的异质性及景观格局对沙漠化有明显的影响^[11,12]。所以,景观结构对沙漠化过程的影响分析是阐述沙漠化发生发展理论的重要组成部分,是多角度分析沙漠化演变和沙漠化治理成果之需要。

斑块是景观中最主要的要素^[5],斑块层次研究主要针对斑块数量、面积和形状以及它们的动态对生物学和生态学过程的影响;而景观层次的研究则主要针对景观的组成、结构、功能和动态等与生物学和生态学过程的关系^[5]。本文将从斑块层次出发,分析其对区域沙漠化过程的影响。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于内蒙古自治区奈曼旗境内,自然概况见文献^[7,11]。

1.2 信息源与图象解译

本文的分析以内蒙古奈曼旗中部沙区为研究区域,以2000年9月6日的TM影像为信息源,影像几何校正用erdas 8.4完成(图1A)。图像解译和拓扑用Arcview3.2和Arcinfo7.0软件来进行,解译精度为1:10万(Arcview的scale ban可保证解译尺度),根据制图学原理,最小解译面积为200m×200m,解译完成的景观类型图如图1B。在解译中以土地利用/覆盖的特征为解译基础,然后将其重新组合为沙地景观类型。考虑到本文的研究目的,将景观类型划分为流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、农田、下湿地、水体、河道与居民地等8类。其中,参与斑块层次景观结构影响分析的指标包括三个部分:其一,主要受农业生产活动影响的斑块,农田斑块数量(CN)、平均农田斑块面积(CA)和平均农田斑块分维数(CF);其二,主要受畜牧业生产活动影响的斑块,固定沙地斑块数(SN)、平均固定沙地斑块面积(SA)和平均固定沙地斑块分维数(SF);其三为代表农牧活动共同影响的景观总斑块数量(TC)、总平均斑块面积(TA)和总平均斑块分维数(TF)。由于流动和半流动沙丘斑块对沙漠化程度的影响大(见式(1)),而且其本身就是沙漠化的表征^[1],所以本文的分析未采用。

1.3 景观取样

在Arcview界面中,针对原始影像分别建立了11个大小相同、位置不相同的矩形AOI取样区(图1B中的红框区域,Coverage格式),然后在Arcinfo的环境中对沙地景观解译图(Coverage格式)分别用Clip命令截取不同AOI区域的景观解译图。然后,根据AOI区域的属性表中的数据,按照本文的类型划分分别进行统计和计算。

1.4 沙漠化程度与斑块分维数计算

沙漠化程度指数是衡量某一区域沙漠化总体状况的一个数量表征,本文的沙漠化程度指数(DG)用下式来计算^[11]:

$$DG_i = (M_i + k_1 \times SM_i + k_2 \times F_i) / A_i \quad (1)$$

在公式(1)中, DG_i 为研究区的沙漠化程度, M_i 为研究区内流动沙丘地面积, SM_i 为半固定沙丘地面积, F_i 为固定沙丘地面积, A_i 为区总面积, i 为某一时期, k_1 和 k_2 为待定权重因子(在本文中 $k_1=0.6,k_2=0.3$), DG_i 的值变化在0~1之间。

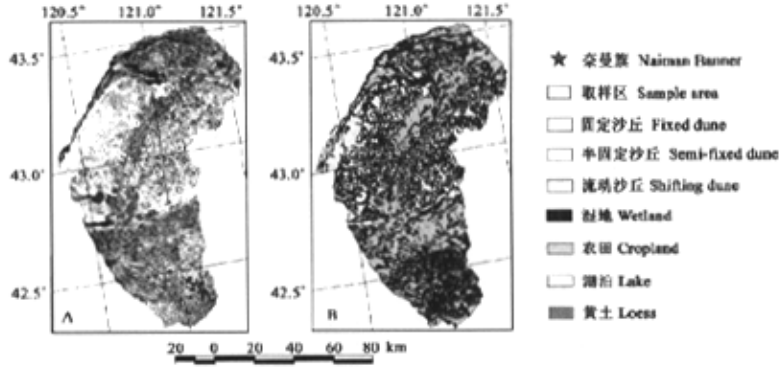


图1 研究区域 TM 影像及沙地景观解译图

Fig. 1 TM image of study area and interpretation map of sandy landscape

A 3,4,5 波段合成 TM 影像 Composed image by band 3, band 4 and band 5; B 解译景观图 Interpreted landscape map

斑块是景观的最主要的组成要素,斑块的维数是采用面积-周长法来测定^[12],即:

$$Z = kA^{F/2} \quad (2)$$

$$F = 2\ln(Z/4)/\ln A \quad (3)$$

本文的格局分析是建立在单个斑块的基础上, $k=4$ 为常数。在公式(2)、(3)中, Z 为斑块周长, A 为斑块面积, F 为分维数,且满足 $1 \leq F \leq 2$ 。 F 值越大,反映斑块的形状越复杂。

在本文中不同类型的斑块分维数(F)用该类型的所有斑块分维数的平均值来表示,即:

$$F = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_i \quad (4)$$

在(4)式中, F_i 为某类型中第*i*个斑块的维数, m 为该类型斑块数量的总数。

斑块结构的影响分析用单因子和多因子二种方法来进行,其中多因子分析用主成分(PCA)分析法,计算过程用 Minitable 9.0 软件来完成。单因子分析用关联分析法,计算过程用 Spss8.0 来完成。

2 结果分析

2.1 斑块结构对沙漠化影响的单因子分析

从本文的取样方法来看,所有取样都位于内蒙古奈曼旗中部沙区,从等级理论的基本原理来看^[13,14],可以认为在景观尺度上该地区所受到的作用过程,如:不同时期国家方针政策所导致的土地利用变化、传统的畜牧业生产方式和气候的时间尺度上的变化等基本上是均质的。不同取样区沙漠化特征的差别是景观结构、功能所引起的^[15]。因此,沙漠化过程与景观结构特征二者之间存在着一定的内在联系^[7~9]。不同斑块指数与沙漠化程度的关联分析表明(表1),固定沙地斑块数(SN)和平均斑块面积(SA)、农田斑块数(CN)和总斑块数(TN)与沙漠化程度(DG)的关联程度极显著(在0.01水平上),关联系数 >0.921 。总平均斑块面积(TA)与沙漠化的关系较显著(在0.05水平上),关联系数 >0.62 。而各类斑块的形状指数SF、CF、TF和农田斑块面积(CA)与沙漠化的关联程度不显著。由此可以明显看出影响沙漠化的主要景观斑块影响力是景观中总斑块数、固定沙地和农田斑块数;各类型斑块的平均面积对沙漠化的影响次之,斑块形状对沙漠化的影响较小。

进一步的回归趋势分析表明(图2):关联程度最高的4个因子与沙漠化程度的关系比较密切,呈线性回归关系,相关系数变化在0.902~0.991之间,相互之间有较高置信度。以相关系数最低的固定沙丘平均斑块面积与沙漠化的关系为例(图2B); $R=0.902 > 0.708 = \alpha_{0.01(10)}$,二者的关系极显著。所以,可以确认图2A、C、D的回归趋势分析结果同样具有极显著的关系。同时,从表1和图2还可以看出,上述4个主要因子对沙漠化的影响是正向的,即随着它们的增加对沙漠化的影响作用也增加。

从反映受畜牧业生产活动影响为主的固定沙丘斑块指数与沙漠化的关联分析来看,其斑块数量、平均斑块面积和斑块形状对沙漠化的影响作用为正向的,说明在斑块水平上多的固定沙丘斑块数量、大的斑块面积和复杂的空间形状有利于该地区的沙漠化发生、发展。与此相反,代表农业生产活动和农牧业共同活动所影响的农田斑块和总斑块与沙漠化的关联分析结果与固定

沙丘斑块不同。二者的共同特点为:第一,斑块数量与沙漠化的关系为正关联,即农田斑块和总斑块的数量增加(景观破碎化)促进了沙漠化的发展;第二,斑块平均面积的增加和形状的复杂化(分维数增加)与沙漠化的关系为负关联。

此外,从表 1 也可以看出与沙漠化程度关联极显著的因子有 4 个(在 0.01 水平上),显著的因子有 1(在 0.05 水平上),而且不同的因子不仅与沙漠化程度有直接的关联,而且相互之间也存在着较高的关联,例如 SN 与 CN、TA、TA 和 SA 与 CN、CA、TN 等。这样的错综复杂的关系说明在景观斑块指数与沙漠化之间不仅存在着简单、直接的关系,而且也存在着间接的关系。因此,斑块结构对沙漠化的影响分析不仅要进行单因子分析,同时还要做多因子分析。

表 1 沙漠化程度与各斑块类型指数关联半矩阵

	DG	SN	SA	SF	CN	CA	CF	TN	TA
* SN	0.963**								
SA	0.902**	0.761							
SF	0.337	0.338	0.251						
CN	0.921**	0.822**	0.926**	0.148					
CA	-0.514	-0.354	-0.673*	0.150	-0.689*				
CF	-0.217	-0.215	-0.279	0.519	-0.261	0.272			
TN	0.991**	0.974**	0.866**	0.319	0.919**	-0.514	-0.247		
TA	-0.620*	-0.663*	-0.446	-0.037	-0.657*	0.587	0.284	-0.710*	
TF	-0.008	0.085	-0.189	0.714*	-0.228	0.695*	0.687*	-0.036	0.355

* 双尾检查关联程度极显著(在 0.01 水平上)Correlation coefficient significant at 0.01 level; * 双尾检查关联程度显著(在 0.05 水平上)Correlation coefficient significant at 0.05 level

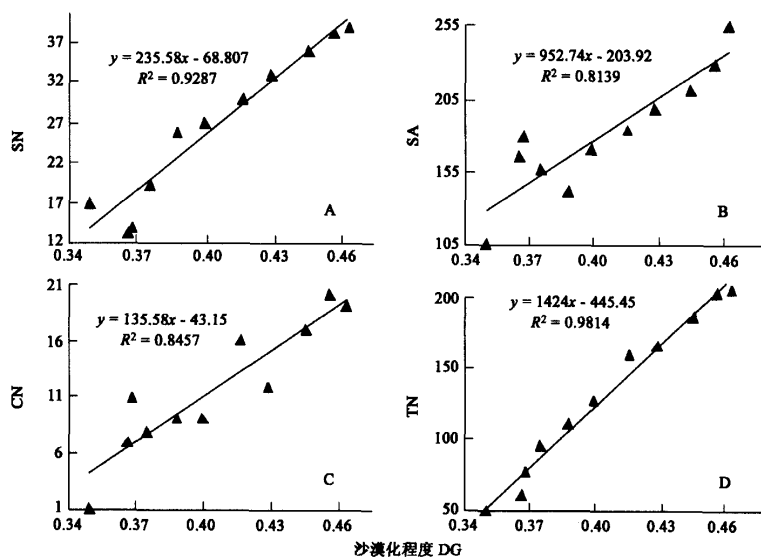


图 2 沙地景观主要斑块指数与沙漠化程度的相关分析

Fig. 2 Association analysis between principal patch indices and desertification degree on sandy landscape

2.2 斑块结构对沙漠化影响的多因子分析

单因子的分析表明,影响沙漠化的斑块结构因子存在直接和间接的错综复杂关系。在多个变量之间具有一定相关关系的情况下,为进一步分析斑块结构对沙漠化的影响,对影响要素进行主成分分析(PCA),因为 PCA 能将所有参加分析因子的影响投影到不同的轴上,并将不同轴所承载信息量计算出来,是综合分析多因子对某一现象影响结果的一种有效方法^[18]。

分析结果表明(表 2),不同的斑块要素对沙漠化的影响可以组合成不同的组份,其中第一组份(PC1)对沙漠化的贡献率为 53.3%,第二组(PC2)的贡献率为 27.5%,二者累计贡献率为 80.8%。说明沙漠化的景观斑块影响力主要有二个合成因素,二者对沙漠化的影响高达 80%以上。

从各斑块要素在主成分中的载荷量来看(表 3),农田斑块数量(CN)、总斑块数量(TN)、固定沙丘斑块数量(SN)和固定沙

地斑块面积(SA)对第一主分量的影响比较大,载荷量变化在 0.391~0.436 之间。这一结果说明,在科尔沁沙地景观中,农田斑块数量、总斑块数量、固定沙丘斑块数量和面积的增加,是该地区沙漠化发展的主要影响因素,其与沙漠化的关系为正相关(表 2)。同时,分析结果也表明,农田斑块平均面积(CA)和总平均斑块面积(TA)对沙漠化的影响作用在第一主成分中占次要地位,其载荷量变化在-0.342~-0.354 之间,而总平均斑块面积和农田斑块平均面积在第一主成分中呈负值,说明在科尔沁沙地大的农田斑块是阻碍沙漠化发展的重要因素。

从第二主成分的载荷量来看,固定沙地斑块分维数(SF)、农田斑块分维数(CF)和总斑块平均分维数(TF),对第二主成分的贡献最大,载荷量变化在-0.426~-0.58 之间。其载荷量为负值,说明它们的空间形状越复杂(分维数越高),则对沙漠化的影响作用越小。因为在科尔沁沙地,自然状况下(无干扰或少干扰)的流动沙丘和半固定沙丘向着固定沙丘方向演化^[2],即沙漠化是向逆转方向发展^[1,2,4]。而上述要素的复杂空间形状表明其具有较长的斑块边界,非常有利于斑块间的物质交流^[5]。而且本文的 TM 影像来源于 2000 年,这一时期是科尔沁沙地(也是我国北方地区)生态保护与建设时期,外界干扰相对较小,所以复杂的空间形状(长的斑块边界)有利于植被恢复,其对沙漠化的影响作用呈负向。从总的情况来看(表 3),第一主成分代表了沙地景观中斑块数量的特征,SN、CN 和 TN 的载荷量分别为 0.391、0.436 和 0.492,是第一主成分中载荷量最大的因子;第二主成分则代表了不同类型斑块的形状特征,SF、CF 和 TF 的载荷量分别为-0.569、-0.426和-0.580,是第二主成分中载荷量最大的因子。

从 11 个取样区在 PC1 和 PC2 轴的排序来看(图 3),11 个取样分成三个类型,类型 1 包含样方 A、E、G、J、K 5 个取样区,该类型的特点是在 PC1 轴的坐标大且为正值,在 PC2 轴的坐标小且为负值,表明这一类型的沙漠化景观影响力以斑块数量的影响为主。经对 5 个取样区的沙漠化程度的计算和统计分析,该类型的沙漠化程度变化在 0.42~0.46 之间,平均为 0.44(±0.017)。类型 2 包括样方 B、C、H、I,该类型的特点是在 PC1 轴的坐标小且为负值,在 PC2 轴的坐标大且为正值,表明这一类型的沙漠化景观影响力以斑块形状的影响为主。该类型的沙漠化程度在 0.37~0.40 之间,平均为 0.38(±0.014)。类型 3 仅包括二个样方 D 和 F,在 PC1 轴和 PC2 轴的坐标都为负值,说明该类型受斑块数量和形状的影响较小,统计分析表明该类型的沙漠化程度为 0.36(±0.012)。总的来看,类型 1(0.44)>类型 2(0.38)>类型 3(0.36),说明科尔沁沙地斑块结构对沙漠化的影响以斑块数量影响最大,其次为斑块的形状,景观中平均斑块面积对沙漠化的影响作用甚微。

4 结论

描述景观特征的数量化指标有很多,在斑块尺度上斑块数量、平均斑块面积以及斑块的空间形状等是主要的斑块特征,也是景观分析中最易获得的数量化指标^[5,17]。在假定不同斑块结构对沙漠化的影响是相互独立的前提下(单因子分析),沙地景观中不同类型斑块的数量对沙漠化过程的影响极为明显。从本文的研究方法的特点来看,11 个取样区的面积相等,斑块数量的增加意味着景观的破碎化程度高^[18,19],而在沙地景观中不同沙地类型斑块数量的增加是沙漠化发生、发展的基础^[7,8]。同时,从 PCA 的分析结果来看 PC1 轴主要承载着不同类型斑块数量的信息(按斑块数量、平均面积和平均斑块形状指数 3 种类型比较)(表 3),而该轴对所有分析因子的贡献率高达 53.3%,所以,单因子和多因子的分析都表明在沙地景观中斑块数量的增加是沙漠化景观的主要影响力。

从不同沙地斑块类型对沙漠化过程的影响分析结果来看,固定沙丘斑块对沙漠化的发生、发展起正向的影响作用,斑块的

表 2 特征值及主成分贡献率

Table 2 Eigenvalues and cumulative percentage of component

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
特征值 Eigenvalue	4.798	2.477	0.754	0.585	0.295
贡献率(%) Proportion	53.3	27.5	8.4	6.5	3.3
累计贡献率(%) Cumulative percentage	53.3	80.8	89.2	95.7	99.0

表 3 主成分载荷量

Table 3 Loadings of component

变量 Variable	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3	第四主成分 PC4	第五主成分 PC5
SN	0.391	-0.234	0.336	0.104	0.204
SA	0.409	-0.094	-0.090	-0.523	-0.028
SF	0.049	-0.569	-0.145	-0.023	-0.758
CN	0.436	-0.068	-0.071	-0.164	0.288
CA	-0.342	-0.232	0.620	0.053	0.126
CF	-0.184	-0.426	-0.633	0.187	0.468
TN	0.429	-0.186	0.176	0.023	0.109
TA	-0.354	-0.046	0.016	0.806	0.123
TF	-0.161	-0.580	0.189	-0.017	0.193

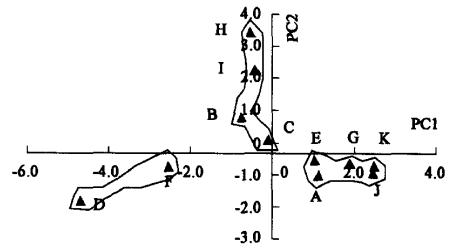


图 3 不同样区斑块结构对沙漠化过程作用的 PCA 排序
Fig. 3 PCA ordination of patch structure influence upon desertification process of different sample areas

各种指数(SN, SA和SF)与沙漠化的关系都为正关联(表1, 3)。其中SN增加是景观破碎化的一个指标, 在前面的讨论中已有论述, 而SA的正向影响作用与其本身是沙漠化程度的组成部分(公式1)有关, 至于SF对沙漠化的正向影响则与SF增加对应于固定沙丘斑块边界的生长, 从而导致风蚀界面增大而促进沙漠化的发展有关^[20, 21]。相比较而言, 农田斑块对沙漠化的影响则较复杂, 其中斑块数量(CN)与沙漠化的关系为正关联, 而平均斑块面积(CA)和平均形状指数(CF)与沙漠化的关系为负关联。CA与CF对沙漠化的影响为负向, 表明在科尔沁沙地大的、具有相对复杂空间形状的农田斑块(呈狭长形或矩形)对沙漠化过程有阻滞作用。

整体上来看, 单因子分析的关联程度和PCA分析中固定沙丘和农田斑块的各个指数对主分量轴(PC1和PC2)的载荷量都表明, 放牧生产活动(主要作用于固定沙丘区域)对沙漠化的影响大于农业生产活动(主要作用于农田区域), 这一结果与已有的研究结果一致^[1, 2, 4]。

References:

- [1] Zhu Z D, Liu S. *Desertification processes and rehabilitation division in north of China*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1981. 32~33.
- [2] Liu X M, Zao H L, Zhao A F. *Wind-sandy Environment and Vegetation in the Horqin Sandy Land*. Beijing: Science Press, 1996. 191~221.
- [3] Ci L J. Desertification Response upon Global Change in China. *Journal of Natural Resources*, 1994, 9(4):289~303.
- [4] Wang T, Zhao H L, Xiao H L. Advance of desertification research in China. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(3):221~226.
- [5] Forman R T T and Godron M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley and Sons, 1986. 335~341.
- [6] Xiao D N, Bu R C, Li X Z. Ecological spatial theory and landscape heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5):453~461.
- [7] Chang X L, Wu J G. Spatial analysis of pattern of sandy landscapes in Kerqin, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3):225~232.
- [8] Wu B, Ci L J. Temporal and spatial patterns of landscape in the Mu Us sandland, northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2):191~196.
- [9] Li F, Sun S H. A preliminary research on landscape ecology application in desertification monitoring and assessment——A case study. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3):481~485.
- [10] Vaveh Z. Landscape ecology as an emerging branch of human ecosystem science. *Advance in Ecological Research* 1999, 12:189~237.
- [11] Chang X L, Gao Y B. Quantitative Expression in Regional Desertification Study. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4):106~110.
- [12] Forman R T T, Godron M. *Landscape ecology*. New York: John Wiley and Sons, 1986. 194~203.
- [13] Wu J, Loucks L. From balance of nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *Q. Rev. Biol.*, 1995, 70(4):439~466.
- [14] O'Neill RV, Gardner R H, Milne B T, et al. Heterogeneity and spatial hierarchies. In: J Kolasa, Pickett S T A ed. *Ecological Heterogeneity*. New York: Springer-Verlag, 1991. 85~96.
- [15] Chang X L, Zhao A F, Li S G. Vulnerable Ecotone, Spa-temporal Scale and Hierarchy, *Journal of Desert Research*, 1999, 19(2):115~119.
- [16] Yang H X, Lu Z Y. *Quantitative classification method of plant ecology*. Beijing: Chinese Science Press, 1981. 232~252.
- [17] Turner M G, and Gardner R H. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. New York: Springer-Verlage, 1991. 105~126.
- [18] Trani, M K, Giles R H Jr. An analysis of deforestation: metrics used to describe pattern change. *Forest Ecology and Management*, 199, 114:459~470.
- [19] Skole D, Tucker C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 1993, 260:1905~1910.
- [20] Liu L Y. The quantity and intensity of regional Aeolian sand erosion and deposition; the case of Shanxi-Shanxi-Nei Mogngol region. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(1): 59~68.
- [21] William E R, William B M, Turner I B L. Modeling land use and land cover as part of global environment change. *Climatic Change*, 1994, 28:45~46.

参考文献:

- [1] 朱震达, 刘恕. 中国北方沙漠化过程与分区治理. 北京: 林业出版社, 1981. 32~33.
- [2] 刘新民, 赵哈林, 赵爱芬. 科尔沁沙地风沙环境与植被. 北京: 科学出版社, 1996. 191~221.
- [3] 慈龙俊. 全球变化对我国荒漠化的影响. 自然资源学报, 1994, 9(4):289~303.
- [4] 王涛, 赵哈林, 肖洪浪. 中国荒漠化研究进展. 中国沙漠, 1999, 19(3):221~226.
- [5] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报, 1997, 17(5):453~461.
- [6] 常学礼, 郭建国. 科尔沁沙地景观格局的特征分析. 生态学报, 1998, 18(3):225~232.
- [7] 吴波, 慈龙俊. 中国北方毛乌素沙地景观格局的时空格局. 生态学报, 2001, 21(2):191~196.
- [8] 李峰, 孙可衡. 景观生态学在荒漠化监测与评价中应用的初步研究——以青海沙珠玉地区为例. 生态学报, 2001, 21(3):481~485.
- [9] 常学礼, 高玉葆. 区域沙漠化研究中的沙漠化数量表征. 中国沙漠, 2003, 23(2):106~110.
- [10] 常学礼, 赵爱芬, 李胜功. 态脆弱带的尺度与等级特征. 中国沙漠, 1999, 19(2):115~119.
- [11] 阳含熙, 卢泽恩. 植物生态学的数量分类. 北京: 科学出版社, 1981. 232~252.
- [12] 刘连友. 区域风沙蚀积量和蚀积强度初步研究(以晋陕蒙接壤区为例). 地理学报, 1999, 54(1):59~68.