

包头市草原景观斑块耦合网络结构特征研究

刘建华¹ 王 戈¹ 杨 斓¹ 刘晓希² 于 强¹ 岳德鹏¹
(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学外语学院, 北京 100083)

摘要: 以内蒙古自治区包头市为研究区,选取包头市 2016 年夏季成像的 Landsat OLI 影像解译并结合外业调查,提取全域内草原景观斑块共 28 009 个。利用原始影像计算归一化差分植被指数 (NDVI),根据研究区 NDVI,把草原景观分为 12 级,构建草原景观网络。在景观水平上选取 25 个指数、类型水平上选取 24 个指数,对草原景观的空间格局、形状特征、聚集程度等进行分析。结果表明,在景观尺度上,包头市全域内景观相似临近百分比指数和散布与并列指数较高,景观分割指数较低。在类型尺度上,1~7 级面积所占比例较高,斑块密度较低,聚合度较高;8~12 级面积所占比例较低,景观分割指数高,景观破碎,连通性差。利用度及度分布、平均路径长度、聚类系数分析草原景观网络特点发现,该草原景观网络的度为 6 的节点有 5 个,度最大值为 8 的节点有 2 个,平均路径长度为 1.606 1,草原景观网络具有明显的非均匀性。

关键词: 包头市; 草原景观; 景观格局指数; 复杂网络

中图分类号: P941.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0196-08

Structural Characteristics of Coupling Network of Grassland Landscape Patches in Baotou City

LIU Jianhua¹ WANG Ge¹ YANG Lan¹ LIU Xiaoxi² YU Qiang¹ YUE Depeng¹
(1. *Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
2. *Foreign Language College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*)

Abstract: Baotou City of Inner Mongolia was selected as the study area. The Landsat OLI image of Baotou City in summer of 2016 was selected as the research data for interpretation. Totally 28 009 grassland landscape patches were extracted. The normalized difference vegetation index (NDVI) was calculated from the original image. According to the NDVI of the study area, the grassland landscape was divided into 12 levels. Based on 12 levels of grassland landscape, a network of grassland landscapes was constructed. At the landscape level, totally 25 indices were selected, and at the type level, 24 indices were selected. Using these indices, the spatial pattern, shape characteristics and degree of aggregation of the grassland landscape were analyzed. The results showed that the landscape similarity percentage index and the distribution and the side-by-side index were higher on the landscape scale, and the landscape segmentation index was lower in the whole territory of Baotou City. The proportion of grades 1~7 was high, the density of landscape patches was low, and the aggregation index was high. The proportion of grades 8~12 was low, the landscape segmentation index was high, the landscape was broken and the connectivity was poor on the type scale. The degree of utilization and degree distribution, average path length and clustering coefficient were used to analyze the characteristics of grassland landscape network. Five nodes with a degree of 6 were found in the grassland landscape network. The maximum value was 8, with 2 nodes, and the average path length was 1.606 1. The results showed that the grassland landscape network had obvious non-uniformity. The research results had practical significance for the structural optimization of the grassland landscape in Baotou City and the stable development of the structure.

Key words: Baotou City; grassland landscape; landscape pattern index; complex network

收稿日期: 2019-01-04 修回日期: 2019-01-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(41371189)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD16B00)
作者简介: 刘建华(1980—),女,博士生,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail: lijhua678@126.com
通信作者: 岳德鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事景观生态学和土地评价研究,E-mail: yuedepeng@126.com

0 引言

草原是地球上分布最为广泛的一种生态系统,草原生态系统的生态作用十分明显^[1]。我国有大面积的草原景观,主要分布在内蒙古高原、宁夏黄土高原、东北平原、青藏高原以及新疆部分山区^[2]。北方草原不仅是中国传统的畜牧业基地,而且是我国中原地区的绿色生态屏障,在调节气候、涵养水源、固持碳素和防止沙尘暴等方面发挥着极其重要的生态作用。包头市丘陵草原面积占总面积的75.51%,草原景观是包头市的主体景观类型^[3]。包头市位于北方游牧区和中原农耕区的交错地带,草原景观的生态作用至关重要。

随着荒漠化问题的加剧,中国北方草原景观也受到了极大的威胁,草原退化问题已经成为目前的研究热点和难点^[4],草原景观结构的完整性对于维持区域生态环境稳定和区域生态安全至关重要,对于草原景观结构进行准确评价已经成为研究重点^[5]。针对景观结构评价的研究较多,主要利用GIS空间分析方法、地学信息图谱方法、园林结构设计方法、景观生态学分析法和空间格局分析法等对流域、区域、森林等进行景观结构分析评价^[6],而针对草原景观进行多层次的结构分析目前研究较少。

草原景观斑块与森林斑块间具有一定的相似性,斑块间进行着各种复杂的生态过程,斑块间通过物质与能量的流动耦合维持总体可持续形态,形成“斑块耦合体”。本研究以包头市为研究区,基于草原景观斑块的“斑块耦合体”理论^[7],结合GIS空间分析技术和景观格局指数分析方法,对包头市的草原景观的空间结构、景观结构以及斑块耦合体结构进行评价研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

包头市面积27 768 km²,位于内蒙古自治区西部,东经109°13′~111°26′,北纬40°13′~42°44′,如图1所示。包头市深处内陆,气候为典型的温带干旱、半干旱大陆性气候,冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨^[8],年平均气温2.0~7.7℃,年均降水量175~400 mm,年均蒸发量2 100~2 700 mm。包头市可利用地表水总量为9×10⁸ m³,地下水补给量为8.6×10⁹ m³。黄河流经包头市境内214 km,水面宽130~458 m,最大流量6 400 m³/s,年平均径流量为2.60×10¹¹ m³,是包头市主要用水来源^[9]。包头市海拔范围为976~2 317 m,地势中间高南北低,北部丘陵、中部山地、南部平原分别占土地面积的

14.49%、75.51%和10%^[10]。干旱的气候条件与起伏的地貌特征使得包头市生态环境较为脆弱,面临较高的水土流失与土地沙漠化、荒漠化风险。近年来,包头市城市建设规模扩张迅速,房地产开发项目、工业园区等建设项目不断涌现,导致草地、林地、湿地等生态用地遭到占用与破坏,生态风险有所升高^[11]。



图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

1.2 数据来源与处理

本文选取包头市2016年夏季成像的Landsat OLI影像数据(来自地理空间数据云平台)为研究素材,影像的空间分辨率为30 m,云量低于10%。对影像进行波段合成、图像增强和几何校正处理,选择最大似然监督分类法对遥感影像进行目视解译,提取包头市的土地景观类型信息,使用ArcMap 10.4进行细碎斑块处理,结合外业调查确定出包头市草原景观类型共3类:人工牧草地、天然牧草地、其他草地。利用原始影像计算归一化差分植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)。

1.3 草原景观分类

包头市草原景观由于其植被盖度不均匀,可以进一步进行分类和分区。本研究根据包头市土地利用二级分类数据集遥感影像提取NDVI数据。根据景观分类的主导因子原则和NDVI,将研究对象草原景观在ArcGIS中按照自然段点法进行分级^[12]。

包头市全域有28 009个作业管理单元(草地斑块),127 437个不同用地类型斑块(小班)。共有32种用地类型,其中草地类3种,按NDVI将其分为12个等级,如表1所示。

1.4 景观格局指数

为了全面揭示包头市草原景观的格局特征,从斑块特征、空间邻接度、景观多样性等多个方面,分别在景观水平和类型水平上选取景观指数,对草原景观的空间格局、形状特征、聚集程度等进行分析。

表 1 草原景观分级
Tab.1 Grassland landscape stratification

组织层级	景观类型及代码
整合层级	草地(1)
分化层级	天然牧草地(11)、人工牧草地(12)、其他草地(13)
精细层级	1 级(-0.256 52 ~0.090 015)、2 级(0.090 015 ~0.108 493)、3 级(0.108 493 ~ 0.124 603)、4 级(0.124 603 ~ 0.148 767)、5 级(0.148 767 ~ 0.170 088)、6 级(0.170 088 ~0.191 409)、7 级(0.191 409 ~0.215 574)、8 级(0.215 574 ~0.239 738)、9 级(0.239 738 ~0.278 607)、10 级(0.278 607 ~0.326 182)、11 级(0.326 182 ~0.391 382)、12 级(0.391 382 ~0.783 294)

其中景观水平上选取 25 个指数,类型水平上选取 24 个指数。

景观水平上的指数分别是 TA、NP、PD、LPI、LSI、AREA_MN、AREA_AM、AREA_RA、AREA_SD、AREA_CV、GYRATE_MN、GYRATE_AN、GYRATE_MD、GYRATE_RA、GYRATE_SD、GYRATE_CV、FRAC_MN、CONTAG、PLADJ、IJI、COHESION、DIVISION、MESH、SPLIT、AI。

类型水平上的指数分别是 CA、PLAND、NP、PD、LPI、TE、ED、AREA_MN、AREA_AM、AREA_MD、AREA_RA、AREA_SD、AREA_CV、GYRATE_MN、GYRATE_AM、GYRATE_MD、GYRATE_RA、GYRATE_SD、GYRATE_CV、CLUMPY、PLADJ、IJI、DIVISION、AI。各指数采用 FRAGSTATS4.2 软件进行计算,公式及说明参照文献[13]。

1.5 复杂网络模型

利用 ArcGIS 软件中空间关系建模等功能,把草原景观斑块耦合体抽象成由 N 个节点、 E 条边构成的草原景观斑块耦合网络 $G=(N,E)$,其中节点代表一种草原景观类型,网络中的边代表草原景观斑块间相互作用的公共边界^[14]。然后利用空间统计中的工具把网络转换为表,再将表调整为 Pajek 能识别的.net 格式的网络数据。

1.5.1 度及度分布

在一个生态网络中,生态节点 v_i 与其他的节点通过边相连,这个节点的度就是与该生态节点相连接的边数,即生态节点之间的生态廊道的数量^[15]。

生态网络中生态节点的度的大小是不同的,如果度越大,那么说明这个生态节点的重要性越高,这个生态节点在生态网络中的地位越高^[16]。网络的平均度是衡量一个生态网络结构的重要指标^[17]。计算公式为

$$k=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^Nk_i$$

(1)

式中 k ——网络平均度

k_i ——每个节点的度

i ——节点编号

在复杂生态网络中,生态节点的度在统计学上

服从一定的分布函数,这个分布函数用 $P(k)$ 来表示^[18]。生态节点的度分布 $P(k)$ 代表了在一个生态网络中,度为 k 的生态节点的占比,分布函数 $P(k)$ 就是度为 k 的生态节点被抽取到的概率^[19]。

规则网络和完全随机网络的度分布特征是完全不同的,完全随机网络的度分布被称作 Poisson 分布^[20]。而实际的生态网络不是完全的随机网络,它并不遵循完全的 Poisson 分布。实际网络的度分布一般呈现出一定的幂律分布,这种分布特征在复杂网络理论中称为无标度性^[21]。如果一个网络完全呈现出幂律分布的特征,那么这个复杂网络称为无标度网络。实际的生态网络大多数同时具有均匀性和非均匀性,度分布同时包含幂律分布和 Poisson 分布的特征^[22]。

1.5.2 平均路径长度

对于一个复杂生态网络,两个生态节点 v_i 和 v_j 如果能够通过多个生态廊道相互连通,且有多种途径可以联通,这两个生态节点之间的距离 d_{ij} 是生态廊道联通路径的最短路径上生态廊道的数量。如果两个生态节点在生态网络中不能通过生态廊道相连,就表明它们之间的距离无穷大,它们之间的生态能量的流动效率是零。当一个生态网络中存在两个生态节点之间的距离是无穷大时,这个生态网络的联通性会较低^[23]。

一个复杂生态网络中任意两个生态节点之间的距离的最大值称为该生态网络的直径 P ,计算公式为

$$P=\max_{1\leqslant i<j\leqslant N}d_{ij}$$

(2)

平均路径长度 L 是评价网络拓扑结构的重要指标,对于一个生态网络,网络中任意两个生态节点之间的距离在计算得到后,对其取平均值就是该生态网络的平均路径长度,计算公式为

$$L=\frac{1}{C_N^2}\sum_{1\leqslant i<j\leqslant N}d_{ij}$$

(3)

平均路径长度具有重要意义。在实际网络中,比如一个交通网络,平均路径长度代表了两个交通站之间最短连接通道上经过交通站的平均数量^[24]。对于生态网络,平均路径长度代表了两个生态节点

之间的最短生态廊道上的生态节点的平均数量。对于实际的复杂网络,节点的数量不能反映平均路径长度,节点数目多,平均路径长度不一定就大,节点数目多的复杂网络的平均路径长度一般却很小。

1.5.3 聚类系数

在包头市的实际草原景观网络中,与一个生态节点相连的两个生态节点也可能是相连接的关系,这表明这些生态节点有一定的聚类特性。由于生态网络中节点存在一定的聚类特性,聚类系数就被建立出来。聚类系数是一个衡量生态网络节点之间聚类关系的重要拓扑指标^[25]。聚类系数 C_i 被定义为节点 v_i 的 k_i 个邻域节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能边数 $C_{k_i}^2$ 之间的比值,其计算公式为

$$C_i = \frac{E_i}{C_{k_i}^2}$$

(4)

对于整个生态网络,得到所有节点的聚类系数后,将所有生态节点聚类系数取平均值,就得到了这个生态网络的平均聚类系数 C ,计算公式为

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$$

(5)

生态网络的平均聚类系数的取值范围是 0~1,当所有节点都是孤立的,即没有任何连接边时, $C=0$,当整个网络中的任意两个节点都是直接相连时, $C=1$ 。 C 越大,表明生态网络中的生态节点之间的联系越紧密,生态网络中各个生态节点的直接联系程度越大。网络直径越小、聚集系数越大的网络小世界特性越强,反之越弱。绝大多数的实际网络都具有聚类效应,这表明实际复杂网络并不是完全均匀网络,也不是完全非均匀网络^[26]。

2 结果与分析

2.1 草原景观分区

根据土地利用类型数据,在包头市全域内共提取 28 009 个草地斑块。大块草原景观斑块分布在包头市北部,由于中部山脉分布大量灌木林地,导致中部草原景观斑块破碎。城区位于包头市南部,大量农田分布在城区周围,导致南部草地景观类型与其他草地,且为破碎板块。全域内天然牧草地斑块数量最多,共 14 675 个,大块(面积大于 1 km²)分布在包头市北部,细碎斑块(面积小于 0.01 km²)分布在中部、南部。其他草地共有 12 438 个,大部分位于包头市南部,部分位于北部和中部。人工牧草地斑块数量最少,共有 896 个,均为细碎斑块,分布于包头市中部,具体分布如图 2 所示。

提取包头市全域内 NDVI,由于包头市南部为城区,人工植被密集且周围有大量农田,导致南部

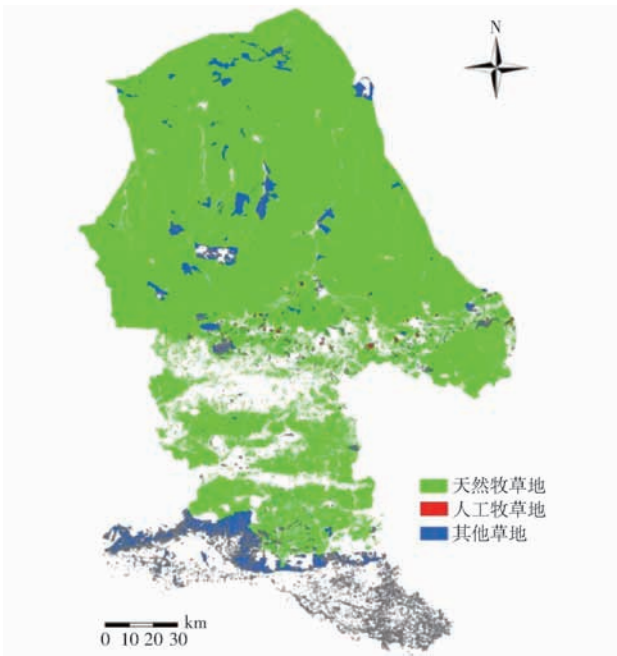


图 2 草地分布
Fig.2 Grassland distribution

NDVI 值较高。大块天然牧草地分布在北部,导致北部 NDVI 较低。大面积灌木林地分布在包头市中部,导致中部 NDVI 偏低。且中部有少量农田,导致中部小区域内 NDVI 较高,研究区 NDVI 分布如图 3 所示。

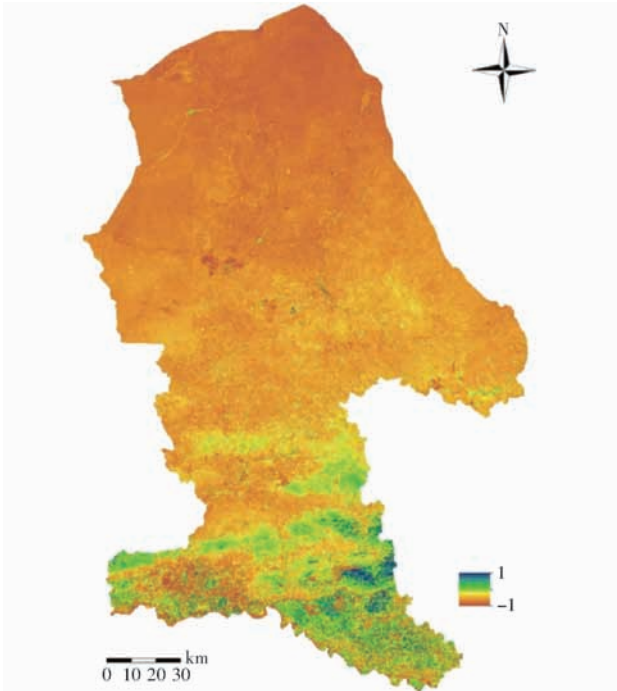


图 3 研究区 NDVI 分布
Fig.3 NDVI distribution in study area

对包头市全域内草地按 NDVI 进行草地斑块分级,共 12 级,等级大致从北到南部逐渐升高。北部大块天然牧草地等级为 1、2、3 级,由于天然牧草地 NDVI 较低,导致分级等级偏低。中部温度、降水量

等自然因素均优于北部,所以中部牧草地 NDVI 较高,分级等级较高。南部自然因素较好且有河流分布,大部分为人工草地,因此南部草地 NDVI 最高,分级为最高等级,研究区 NDVI 分级如图 4 所示。

2.2 草原景观斑块格局分析

景观尺度景观格局指数如表 2 所示。包头市全域内草原景观总面积 2 008 001 km²,斑块密度为 19.92 个/km²,最大斑块占草原景观面积比指数较高,邻近度指数为 54.867%。相似临近百分比指数和散布与并列指数较高,斑块凝聚指数为 99.833%。景观分割指数较低,为 0.971 7。有效粒度面积为 56 919.15 km²,分离度较低,为 35.278 1%,聚合度较高,为 98.984 1%。

类型尺度景观格局指数如表 3 所示。1 级斑块与草原景观百分比较低,斑块密度较低,散布与并列指数最低。2 级斑块与草原景观百分比较高,斑块密度较低,聚合度较高。3 级斑块与草原景观百分比较高,聚合度较高。4 级斑块与草原景观百分比最高,散布与并列指数较高。5 级斑块与草原景观

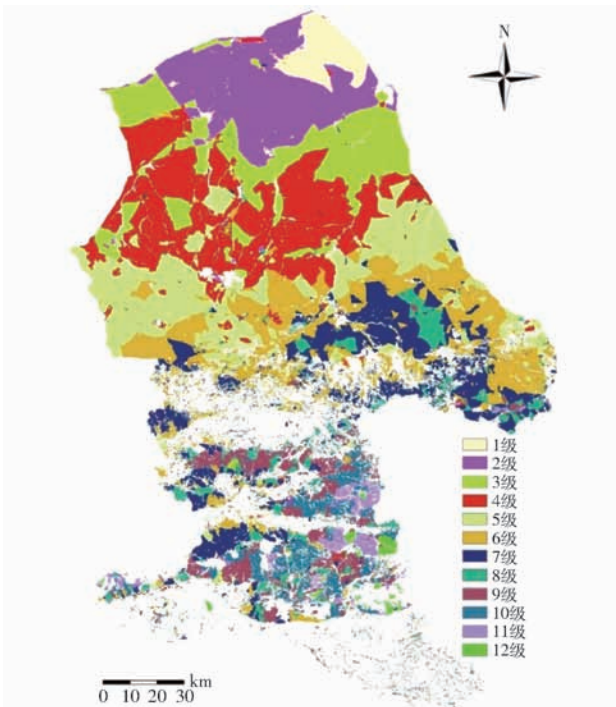


图 4 研究区 NDVI 分级
Fig. 4 NDVI classification of study area

表 2 景观尺度景观格局指数

Tab.2 Landscape pattern index in landscape scale

参数	景观面积/km ²	斑块密度/(个·km ⁻²)	最大斑块指数/%	平均分维数	邻近度指数/%	相似临近百分比指数/%
数值	2008 001	19.92	10.928 4	1.117 6	54.867	98.961 8
参数	散布与并列指数/%	斑块凝聚指数/%	景观分割指数	有效粒度面积/km ²	分离度/%	聚合度/%
数值	75.563 1	99.833	0.971 7	56 919.15	35.278 1	98.984 1

表 3 类型尺度景观格局指数

Tab.3 Landscape pattern index in type scale

草地等级	草地景观百分比/%	斑块密度/(个·km ⁻²)	最大斑块指数/%	丛生度	相似临近百分比指数/%	散布与并列指数/%	类型分裂指数	聚合度/%
1	2.791 9	0.015 0	2.668 0	0.997 5	99.713 5	52.193 6	0.999 3	99.755 6
2	11.372 3	0.020 2	10.928 4	0.998 1	99.810 0	67.162 7	0.988 1	99.830 9
3	10.975 8	0.034 1	3.034 5	0.996 2	99.637 8	58.723 1	0.998 2	99.659 1
4	18.380 3	0.091 2	7.531 1	0.994 4	99.527 7	70.061 1	0.992 6	99.544 1
5	15.114 4	0.159 2	5.073 1	0.990 5	99.174 1	63.111 3	0.996 6	99.192 1
6	15.503 5	0.212 2	3.004 8	0.984 8	98.699 5	64.762 0	0.997 8	98.717 2
7	11.003 8	0.206 6	1.673 1	0.982 1	98.381 6	65.740 9	0.999 5	98.402 6
8	4.513 0	0.166 9	0.912 6	0.975 8	97.653 2	76.074 3	0.999 9	97.685 7
9	4.543 7	0.173 5	0.401 4	0.973 5	97.442 4	78.915 6	0.999 9	97.474 7
10	3.448 8	0.115 9	0.445 0	0.973 8	97.434 8	76.734 3	0.999 9	97.471 8
11	1.755 6	0.079 8	0.264 7	0.972 9	97.284 6	77.222 5	1	97.336 4
12	0.596 9	0.070 8	0.196 2	0.968 4	96.773 8	73.085 4	1	96.862 3

百分比较高,最大斑块指数较高,散布与并列指数较高。6 级斑块与草原景观百分比较高,斑块密度较高,散布与并列指数较高。7 级斑块与草原景观百分比较高,斑块密度较高,最大斑块指数较高,散布与并列指数较高,景观分割指数较高,聚合度较高。8 级斑块与草原景观百分比较低,斑块密度较高,最

大斑块指数低,聚合度较低,相似临近百分比指数较低,类型分裂指数、聚合度较低。9 级斑块与草原景观百分比较低,类型分裂指数较高。10 级斑块与草原景观百分比较低,斑块密度较低。11 级斑块密度较低,类型分裂指数最高。12 级最大斑块指数最低,类型分裂指数最高。

2.3 草原景观斑块耦合网络结构分析

利用 ArcGIS 对包头市全域内草原景观进行重分类,共分为 12 级。用要素转点工具提取各等级的草原景观重心,如图 5 所示。由于黄河位于包头市南部,导致植被覆盖度大致为从南到北递减。根据各级源地空间上的连接关系,不同等级间若相连接,则两者之间的相关系数为 1,构建草原景观的邻接矩阵,如表 4 所示。

根据所提取的草原景观网络,利用度及度分布评价节点度的情况,利用平均路径长度分析网络的联通情况,利用聚类系数分析生态网络的聚集特点。利用这 3 个基本统计指标对其进行基本结构特征分析。图 6 为景观网络度分布图。

由图 6 可知,节点度为 1 的草原斑块节点有 1 个,度为 6 的草原斑块节点数量最多,有 5 个。度最大值为 8,有 2 个节点。度分布较多的斑块等级为 5~8 级,占据了包头市草原景观的大部分面积,连

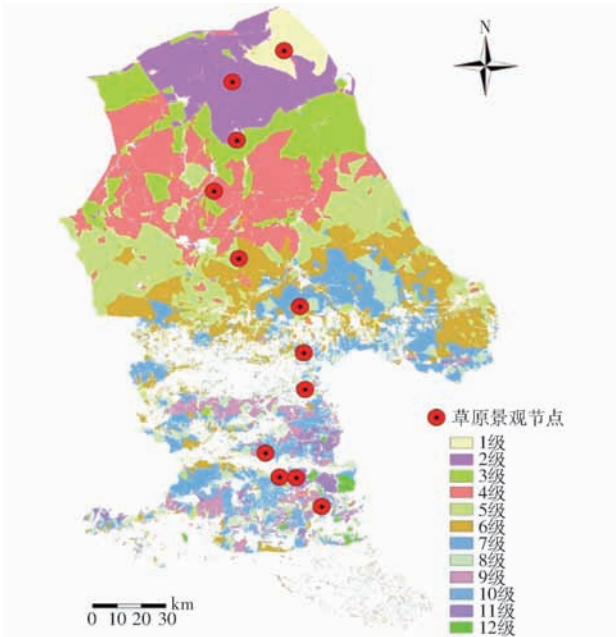


图 5 草原景观节点分布图

Fig. 5 Grassland landscape node distribution map

表 4 草原景观网络邻接矩阵

Tab. 4 Grassland landscape network adjacency matrix

	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级	8 级	9 级	10 级	11 级	12 级
1 级	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 级	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
3 级	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0
4 级	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0
5 级	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
6 级	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
7 级	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
8 级	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
9 级	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0
10 级	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
11 级	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1
12 级	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0

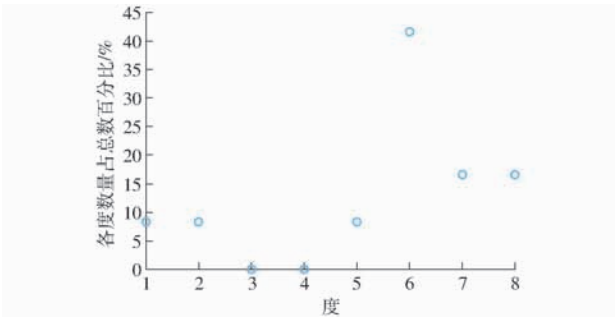


图 6 草原景观网络度分布

Fig. 6 Grassland landscape network distribution

接度高。由于南部耕地、建筑建设用地密布,导致等级较高的草原景观度较低,连通性较差。优化前的草原景观网络的整体散点分布既不是典型的幂律分布,也不是 Poisson 分布,表明该草原景观网络无标

度性特征强于均匀性特征。

对于本研究中提取出来的草原生态网络,任意两个草原景观斑块节点之间的距离是两个节点之间的最短边数。利用 Matlab 编程实现网络平均路径长度的计算,计算得出包头市草原生态网络的平均路径长度为 1.606 1。图 7 所示为草原景观网络平均路径长度分布。

草原景观网络中,一个生态节点可能会同时与其他两个生态节点相连通,所提取的潜在生态网络的聚类系数为 0.613 1。该草地生态网络的小世界特性并不明显,导致该潜在生态网络不具备小世界网络的特性。该潜在生态网络的聚类系数分布图如图 8 所示。该潜在生态网络的聚类系数为 0 的生态节点数量占生态节点总数的 8.33%,有 1 个,这个

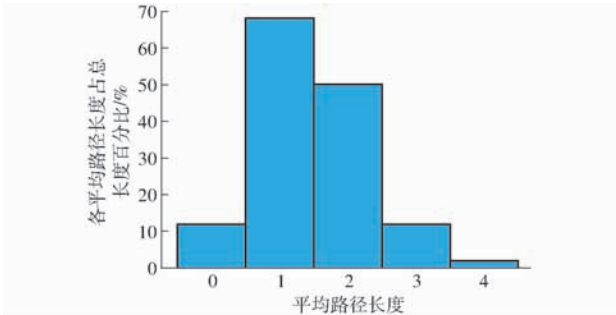


图7 草原景观网络平均路径长度分布

Fig.7 Average path length distribution of grassland landscape network

节点与其他节点不具有集群特点。有3个节点的聚类系数为0.67,2个节点的聚类系数为0.73,这些生态节点具有明显集群特征。从图8可以得到该草原生态网络具有明显的非均匀性。在空间上的分布可能会存在一些区域过于集中,而另一些区域又没有生态节点分布,这样的生态网络结构不稳定性较大。

3 结论

(1)以包头市为研究区,共提取28009个草原景观斑块,大块分布在包头市北部,中部、南部草原斑块破碎。对研究区草地按NDVI共分为12级,从北到南等级逐渐升高。

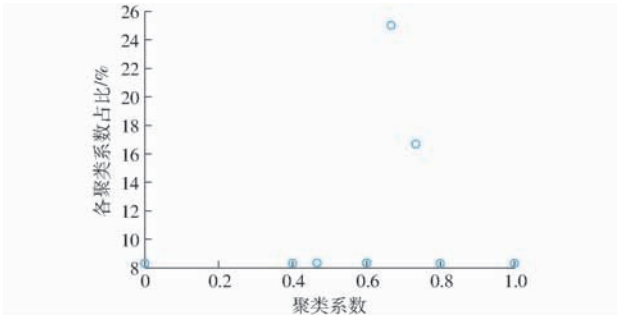


图8 草原景观网络聚类系数分布

Fig.8 Distribution diagram of clustering coefficient of grassland landscape network

(2)基于景观和类型尺度进行景观格局指数计算。在景观尺度上,包头市全域内景观相似临近百分比指数和散布与并列指数较高,景观分割指数较低。在类型尺度上,1~7级面积所占比例较高,斑块密度较低,聚合度较高;8~12级面积所占比例较低,类型分裂指数高,景观破碎,连通性差。

(3)根据所提取的草原景观网络,利用度及度分布评价节点度、平均路径长度、聚类系数分析生态网络的特点,发现该草原景观网络的度为6的草地斑块节点数量有5个,度为8的节点有2个,平均路径长度为1.6061,该草原景观网络具有明显的非均匀性。

参 考 文 献

[1] 代光烁,余宝花,娜日苏,等. 内蒙古草原生态系统服务与人类福祉研究初探[J]. 中国生态农业学报,2012,20(5):656-662.
DAI Guangshuo, YU Baohua, NA Risu, et al. Preliminary study on grassland ecosystem services and human well-being in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 656-662. (in Chinese)

[2] 赵军,魏伟,冯翠芹. 天祝草原景观格局分析及景观利用格局优化[J]. 资源科学, 2008, 30(2):281-287.
ZHAO Jun, WEI Wei, FENG Cuiqin. Landscape pattern analysis and landscape utilization pattern optimization of Tianzhu grassland [J]. Resources Science, 2008, 30(2): 281-287. (in Chinese)

[3] 宝音,包玉海,阿拉腾图雅,等. 内蒙古生态屏障建设与保护[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3):62-65.
BAO Yin, BAO Yuhai, ALATENTOYA, et al. Construction and protection of ecological barrier in Inner Mongolia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(3): 62-65. (in Chinese)

[4] 潘庆民,薛建国,陶金,等. 中国北方草原退化现状与恢复技术[J]. 科学通报,2018,63(17):1642-1650.
PAN Qingmin, XUE Jianguo, TAO Jin, et al. Present situation of grassland degradation and restoration technology in northern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17): 1642-1650. (in Chinese)

[5] 庞立东,刘桂香. 近二十年内蒙古西乌珠穆沁草原景观结构变化及驱动力浅析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(10):155-160.
PANG Lidong, LIU Guixiang. Brief analysis on the change of landscape structure and driving force of Xiuzhumuqin grassland in Inner Mongolia in recent 20 years [J]. Journal of Aird Land Resources and Environment, 2010, 24(10): 155-160. (in Chinese)

[6] 魏伟,石培基,雷莉,等. 基于景观结构和空间统计方法的绿洲区生态风险分析——以石羊河武威、民勤绿洲为例[J]. 自然资源学报,2014,29(12):2023-2035.
WEI Wei, SHI Peiji, LEI Li, et al. Eco-risk analysis of Oasis based on landscape structure and spatial statistical method—take Wuwei and Minqin oasis of Shiyang River as examples [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2023-2035. (in Chinese)

[7] 赵春燕,李际平,郑柳. “森林景观斑块耦合体”的构建研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(7):41-44.
ZHAO Chunyan, LI Jiping, ZHENG Liu. Construction of “forest landscape patch coupling” [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2014, 34(7): 41-44. (in Chinese)

[8] 陈晓敏,解智峰. 城市土地集约利用评价及驱动力分析——以内蒙古包头市为例[J]. 国土资源情报, 2011(6):46-52.

- CHEN Xiaomin, JIE Zhifeng. Evaluation and driving force analysis of urban land intensive utilization; a case study of Baotou City, Inner Mongolia [J]. Land and Resources Information, 2011(6): 46–52. (in Chinese)
- [9] 于佳生. 包头市生态城市评价及对策研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2015.
- YU Jiasheng. Evaluation and countermeasure research of Baotou ecological city [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 王鑫. 包头市工业企业环境污染管理问题与对策研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2015.
- WANG Xin. Environmental pollution management problems and countermeasures of industrial enterprises in Baotou City [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2015. (in Chinese)
- [11] 张敏. 包头市城市建设用地扩展研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2011.
- ZHANG Min. Study on urban construction land expansion in Baotou City [D]. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2011. (in Chinese)
- [12] 庞立东, 刘桂香, 刘建强. 遥感与GIS技术在草地景观分类与制图中的应用——以西乌珠穆沁为例[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 304–309.
- PANG Lidong, LIU Guixiang, LIU Jianqiang. Application of remote sensing and GIS technology in grassland landscape classification and mapping—taking Xiwuzhumuqin as an example [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2010, 31(2): 304–309. (in Chinese)
- [13] BIRTWISTLE A N, LAITURI M, BLEDSOE B, et al. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes [J]. Arid Environment, 2016, 131: 15–24.
- [14] 龚建周, 夏北成. 景观格局指数间相关关系对植被覆盖度等级分类数的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4075–4085.
- GONG Jianzhou, XIA Beicheng. Response of correlation between landscape pattern indices to classification number of vegetation coverage grades [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4075–4085. (in Chinese)
- [15] 唐涛, 李际平, 袁晓红, 等. 基于邻接关系的森林景观斑块耦合网络结构特性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10): 114–118.
- TANG Tao, LI Jiping, YUAN Xiaohong, et al. Structural characteristics of forest landscape patch coupling network based on adjacent relationships [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2016, 36(10): 114–118. (in Chinese)
- [16] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于MSPA与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6425–6434.
- XU Feng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Construction of ecological network of new towns in central and Western Brazil based on MSPA and minimum path method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6425–6434. (in Chinese)
- [17] ATH B D, SCHARLER U M, ULANOWICZ R E, et al. Ecological network analysis: network construction [J]. Ecological Modelling, 2007, 208(1): 49–55.
- [18] 李医民, 李鑫, 华静. 基于复杂网络的生态系统稳定性与生态多样性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1700–1706.
- LI Yimin, LI Xin, HUA Jing. Ecosystem stability and ecological diversity based on complex networks [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1700–1706. (in Chinese)
- [19] JONGMAN R H G. Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks [J]. Landscape & Urban Planning, 1995, 32(3): 169–183.
- [20] 于强, 杨澜, 岳德鹏, 等. 基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 214–224.
- YU Qiang, YANG Lan, YUE Depeng, et al. Investigation on complex spatial ecological network structure based on complex network analysis method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 214–224. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180326&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.026. (in Chinese)
- [21] ADLER J, PARMYD I. Quantifying colocalization by correlation: the Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient [J]. Cytometry Part A, 2010, 77A(8): 733–742.
- [22] LIU L, LIU Y, ZHANG N. A complex network approach to topology control problem in underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(12): 3046–3055.
- [23] 武鹏飞, 宫辉力, 周德民. 基于复杂网络的官厅水库流域土地利用/覆被变化[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 113–121.
- WU Pengfei, GONG Huili, ZHOU Demin. Land use/cover change in Guanting Reservoir basin based on complex network [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 113–121. (in Chinese)
- [24] 周云龙. 复杂网络平均路径长度的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- ZHOU Yunlong. Study on the average path length of complex networks [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [25] 林德明, 刘则渊. 复杂网络研究领域演进中的复杂性[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(17): 174–182.
- LIN Deming, LIU Zeyuan. Complexity in the evolution of complex network research field [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(17): 174–182. (in Chinese)
- [26] 潘灶烽, 汪小帆. 一种可大范围调节聚类系数的加权无标度网络模型[J]. 物理学报, 2006, 55(8): 4058–4064.
- PAN Zaofeng, WANG Xiaofan. A weighted scale-free network model that can adjust clustering coefficients in a wide range [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 4058–4064. (in Chinese)