doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.025

基于最优粒度的翁牛特旗景观格局优化

胡雅慧　于　强　岳德鹏　王朋冲　裴燕如　牛　腾
(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以内蒙古自治区赤峰市翁牛特旗为研究区,计算不同粒度下的景观格局测定指标,综合粒度反推法与主成分分析法识别得出 3 200 m 为最优粒度,依据最优粒度景观特征选取生态源地 51 个。结合地区特征构建生态阻力面,提取生态廊道 49 条、生态节点 58 个,对廊道、节点进行密度分析。结果表明,翁牛特旗东西部生态状况存在显著差异,西部中、低山丘陵区源地、廊道集中,存在 3 处高节点密度区需要重点加强保护建设,东部平原区沙地广布,源地、廊道分散,能量流通主要依赖西拉沐沦河与老哈河,生态结构连通性差。基于最优粒度提取生态源地综合考虑了景观连通性与尺度效应,较传统方法更加科学、客观,可为区域景观格局优化提供参考。

关键词: 翁牛特旗; 景观格局; 生态源地; 粒度反推法; 主成分分析法; 最小累积阻力模型
中图分类号: X171.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)09-0217-09　　**OSID**:

Landscape Pattern Optimization of Wengniute Banner Based on Optimal Granularity

HU Yahui　YU Qiang　YUE Depeng　WANG Pengchong　PEI Yanru　NIU Teng
(*Beijing Key Laboratory of Precision Forestry*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Taking Wengniute Banner of Chifeng City, Inner Mongolia as a research area, the landscape pattern index with different granularities was calculated, and 3 200 m was identified as the optimal granularity based on granularity inverse method and principal component analysis. According to the optimal granular landscape features, totally 51 ecological sources were selected. Combined with the regional characteristics, the ecological resistance surface was constructed, and 49 potential ecological corridors and 58 ecological nodes were extracted. Then, the density analysis of corridors and nodes was carried out. The results showed that there were significant differences in the ecological conditions of Wengniute Banner between the east and the west. The mid-low-mountain hilly areas in the west included three high-node-density areas, which need to be protected and constructed, and the source areas and corridors were concentrated. The sand plains in the eastern plain were widely distributed, and the source areas and corridors were scattered. The energy circulation mainly depended on the Silam River and Laoha River, and the ecological structure was poorly connected. Taking landscape connectivity and scale effects into consideration, the ecological sources were extracted based on the optimal granularity, which was more scientific and objective than traditional methods. The results would provide an objective and effective basis for regional landscape pattern optimization.

Key words: Wengniute Banner; landscape pattern; ecological source; granularity inverse method; principal component analysis; minimum cumulative resistance model

0　引言

随着我国城市化建设的不断推进,人类活动占用大量土地资源,导致生境破碎化程度加剧,区域生态系统功能下降,生态安全问题日益凸显[1-2]。FORMAN[3]提出,景观格局对生态过程具有巨大的影响。文献[4-6]认为,合理稳定的景观格局是促进社会可持续发展的重要保证,通过优化景观格局,

收稿日期: 2019-12-27　修回日期: 2020-01-24
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0507303-2)
作者简介: 胡雅慧(1997—),女,博士生,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail: hu_yahui_one@163.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

即对景观重要组分在数量、空间结构配置等方面进行调整,能够促进生态流的运行与生态过程的发生,加强景观组分间的连通,提高区域生态安全性。

传统的景观格局优化主要依靠概念模型和数学模型等方法,从经验统计的角度寻求优化措施,在描述景观功能和生态过程的相互关系等方面存在很大的局限性[7]。随着地理信息技术的发展,景观分析转向要素空间上的模拟,最小累积阻力(Minimum cumulative resistance,MCR)模型逐渐成为景观格局优化的主要方法[8-9]。基于 MCR 模型判断“关键局部”的优化方法,首先需要确定控制生态过程、发挥重要生态功能的景观组分,格局的优化水平在很大程度上取决于生态源地选取的合理性。现有研究选取生态源地的标准不尽相同,何珍珍等[10]选取面积大于 5 km^2 的林草地及大型水域作为生态源地,傅强等[11]以沼泽滩涂、河流湖泊为栖息地,选定面积 10 km^2 以上的斑块为核心斑块,10 ~ 20 km^2 的斑块为歇脚石斑块,共为格局的“源”。这些选取方法大多依靠经验和主观判断,提取结果误差较大,且生态意义上的代表性不足,缺乏说服力。

景观格局分析具有明显的尺度效应[12-13]。近年来,有学者从粒度入手探究景观组分结构的变化特征[14-16],结合粒度与数学模型揭示生态用地结构的变化机制,这种方法能够克服源地研究的主观性,提高格局优化的准确度与科学性。本文以沙漠广布的翁牛特旗为研究区,综合粒度反推法与主成分分析法,从整体连通性的角度选取生态源地,进而基于 MCR 模型提取关键组分进行景观格局优化,以期为翁牛特旗生态环境建设与可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

翁牛特旗位于内蒙古自治区赤峰市(图 1),地处东经 117°43′ ~ 120°43′,北纬 42°26′ ~ 43°25′,北以西拉沐沦河为界,与林西县、巴林右旗、阿鲁科尔沁旗、开鲁县相望,南与赤峰市松山区相连,东隔老哈河与敖汉旗、通辽市奈曼旗相邻,西接克什克腾旗。总面积 11 807 km^2,总人口 48.6 万。翁牛特旗东西狭长,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候,降水稀少,蒸发量大,人类的滥垦滥伐破坏了当地的生态平衡,土地构成可概括为“五沙四山一分田”,西部属中低山丘陵区,东部属科尔沁沙地。地势西高东低,地面由西向东缓慢倾斜。季风盛行加上大面积的沙地,使得冬春季节多黄沙,对当地草场、良田和水域产生巨大的威胁,严重制约着农牧业生产的发展以及人民生活水平的提高。

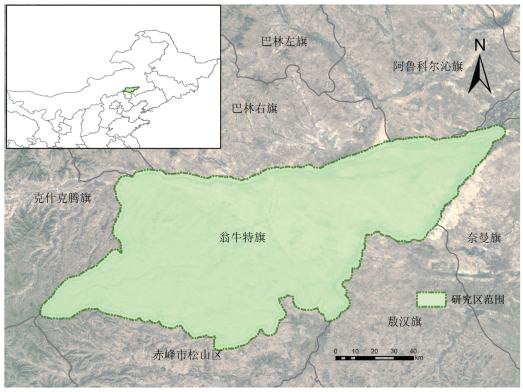


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 数据来源与处理

使用美国地质勘探局(USGS)官网 2018 年翁牛特旗 Landsat 8 OLI 影像,经辐射定标、大气校正、拼接裁剪处理后,利用 ENVI 5.3 软件进行监督分类,将研究区划分为林地、草地、耕地、水体、建设用地以及沙地 6 类。空间分辨率为 30 m 的 DEM 数据来自地理空间数据云,根据数字高程模型(DEM)数据计算得到高程与坡度。利用 ENVI 5.3 软件基于遥感影像获取归一化植被指数(NDVI)与归一化差异水体指数(MNDWI)。地下水埋深采集于翁牛特旗监测井,通过 ArcGIS 克里金插值得到区域面数据。

1.3 粒度反推法

根据景观生态学中“源-汇”的思想,源地一般为物种栖息地,是指面积达到一定规模且具有较高生态服务功能,对维持生态系统发展变化非常重要的景观组分。景观连通性主要反映景观相同组分或不同组分在空间结构、生态过程上的关联性[17]。景观整体连通性深刻影响源地生态服务功能的发挥以及渗透过程,是区域生态流运行以及生态过程发生的基础。

景观格局指数高度概括了景观的空间特征信息,对粒度效应非常敏感[18-19]。粒度反推法以景观格局优化为目的,从景观整体效应的角度选取生态源地,避免了漏选误选的主观错误[20-21]。依据数学反证法的思想,假设生态源地存在不同的结构,首先将生态服务功能较高的景观斑块生成不同粒度的栅格,选取能够反映景观整体性与连通性的景观格局指数,通过对不同粒度下各个指数进行综合计算分析,寻找最优粒度以确定生态源地的数量、布局等特征,作为反选生态源地的重要依据。

1.4 主成分分析法

测定指标的计算结果对最优粒度选取有一定的指示作用,但由于各指标的变化趋势和阈值存在差异,直接选取难以消除分析过程的主观性。采用主

成分分析法计算综合得分，利用降维思想，把多指标转换为少数几个综合指标（即主成分），其中每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息，且所含信息互不重复，实现指标的客观定量分析，结果具有代表性[22]。本文在初步分析测定指标变化特征的基础上，按照累积贡献率大于 80%、特征值大于 1 的原则，通过主成分分析法确定在景观整体性与连通性方面贡献最大的指标构成，并依据主成分构成式计算各粒度的综合得分，识别提取生态源地的最优粒度。

1.5　最小累积阻力模型

生态流是生态系统物质循环、能量流动与信息传递过程的集中体现，生态流在源地之间运行，会受到景观类型、坡度、高程等因素的干扰，需要克服不同程度的阻力[23]。阻力值是对生态流从源地出发向其他斑块运动所需克服的各种阻力的量化描述，MCR 模型通过对克服阻力做的功或累积消耗的成本进行计算，刻画生态流的运动趋势，其公式为

$$V_{MCR}=f_{min}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}(D_{ij}R_i) \quad (1)$$

式中　V_{MCR}——最小累积阻力

n——源类型的数量

f_{min}——土地单元中累积阻力的最小值

m——景观类型的数量

D_{ij}——物种从源地 j 到用地单元 i 的空间距离

R_i——用地单元 i 对生态流的阻力系数

1.6　景观格局优化

1.6.1　生态源地选取

景观格局是自然因素与人类活动共同作用的结果[24]，不同的景观类型对区域生态系统与环境产生影响的性质和程度不相同。一些景观类型具有较高的生态服务价值，如林草地、水体等，能不同程度地促进生态流的运行，对提高区域生态环境质量具有重要意义。基于对不同景观类型作用的认识，提取土地覆盖分类结果中的林地、草地和水体，考虑区域面积与粒度分析的连续性，以 100 ~ 4 200 m 为分析尺度，100 m 为间隔，生成 42 个不同粒度的生态用地组分结构。根据文献[25 - 26]，选择内聚力、分维度、聚合度、平均邻近距离表征景观整体性，斑块数、斑块密度、邻接比率、连接度以及连接度增加百分比表征组分结构连通度。利用 Fragstats 软件计算测定指标，利用 R 语言对结果进行主成分分析并计算综合得分，确定能够更加清晰地代表景观组分结构的指标构成及权重，以质变点所在粒度及其指数特征为参照反选生态源地。

1.6.2　生态阻力面构建

MCR 模型通过量化各种干扰因素的阻碍作用，计算生态流流动到达不同的景观斑块所需耗费的成本构建生态阻力面。以翁牛特旗实际情况为基础，选取对生态流运行有直接影响的地形因子（高程、坡度）、土地覆盖（土地利用分类）、水文因子（MNDWI、地下水埋深）以及植被因子（NDVI）（图 2），对各因子不同水平的阻力进行赋值并将各因子叠加，基于 MCR 模型构建生态阻力面。

1.6.3　生态廊道与生态节点识别

景观生态学认为，生态廊道作为一种连接生态源地的带状景观组分，将分散的生态源地连接成整体，能够为生态流的运行提供支持，关系着整个区域生态结构的连通性[27]。以生态源地为出发点，最小累积生态阻力面作为输入，利用成本路径模型（Cost path model）计算跨越不同斑块所需克服阻力的累加值，迭代运算得到物质能量从任一生态源地流动到其他源地的最小阻力路径。这一过程的计算量随迭

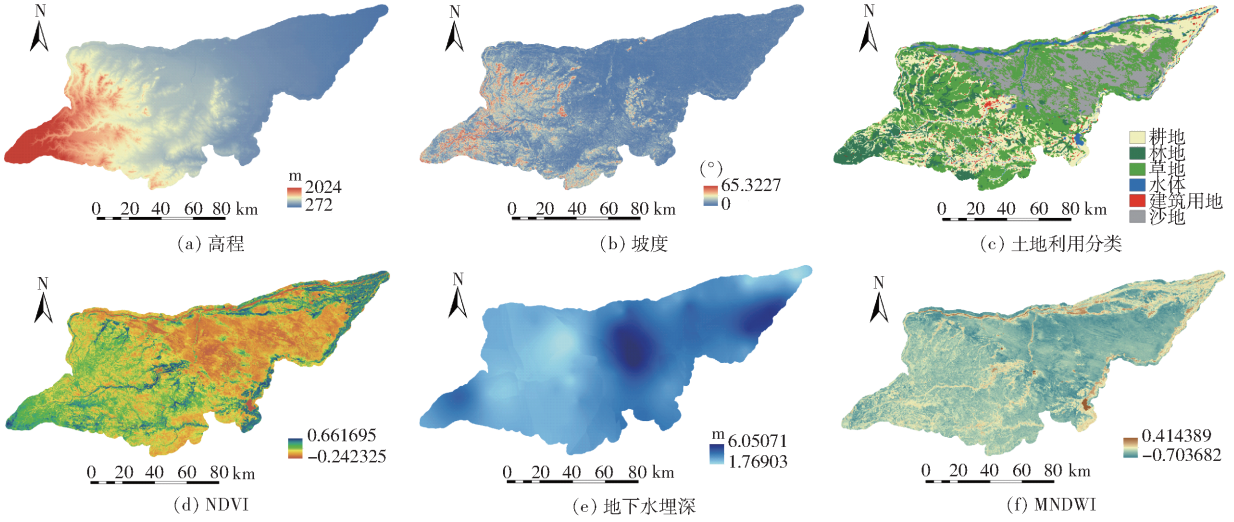


图 2　生态阻力因子

Fig. 2　Ecological resistance factors

代次数的上升而剧增,因此使用 Python 脚本语言编写程序,调用 arcpy 模块完成。

生态节点作为生态廊道中能量流动、物质交换的重要支撑点,是生态斑块与廊道间的“踏板”,同时也是生态廊道中最为脆弱的区域。以生态累积阻力面为基础地形数据,ArcGIS 水文分析工具提取阻力最大路径,也就是山脊线,其与生态廊道交点即为生态节点。生态节点对于支持源地间生态流动,提升空间结构的连通性,增强廊道的稳固性具有重要意义,但由于受到较大的阻力,极易被外界环境干扰。

1.7 密度分析

为了更加直观定量化描述廊道与节点的形态特征,本文采用生态廊道密度分析与生态节点密度分析弥补主观描述的不足。

1.7.1 生态廊道密度

生态廊道密度通过计算研究区内规则单元的廊道长度总和识别生态廊道集中区,反映了生态廊道单位面积下的密集程度[28]。其值越大,说明每单位面积生态廊道总和越长,廊道的密集程度越高,能量流通越顺畅。生态廊道密度公式为

$$D_L = \frac{L}{A} \tag{2}$$

式中 L——单元范围内生态廊道总长度

A——单元区域面积

1.7.2 生态节点密度

由于连接方式的差异,生态廊道密度相同的区域也存在各种不同形态以及复杂程度各异的网络结构,为了进一步补充说明廊道的连接状况与区域整体的景观格局结构,采用生态节点密度量化描述节点分布特征。

生态节点密度反映了生态廊道的连接程度与区域生态状况的复杂程度[29]。生态节点密度越大,说明这一区域受到的干扰越多,生态状况越复杂,在区域景观格局中占据的位置越重要。生态节点密度公式为

$$D_N = \frac{N}{A} \tag{3}$$

式中 N——单元范围内节点总数

2 结果与分析

2.1 生态源地

提取研究区生态效益高的林地、草地以及水体 3 种景观类型斑块共 6 976.741 km^2。生成 42 个不同粒度的生态用地组分结构,以 500 m 为粒度间隔示例(图 3)。在粒度不断增大的过程中,面积规模较小和相对孤立的斑块被不断剔除,斑块数量逐渐减少;相邻或相接的斑块不断合并,规模优势进一步显现。

利用 Fragstats 软件计算 42 个粒度下 9 个测定

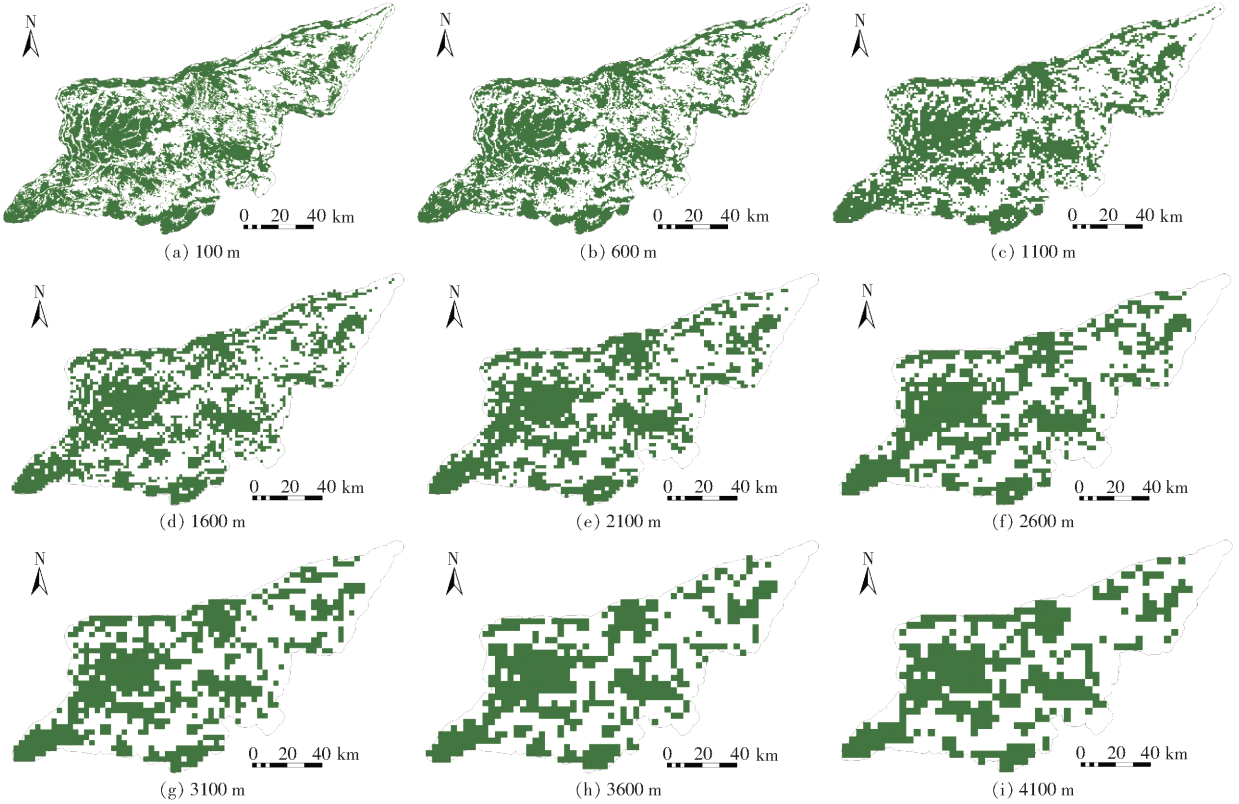


图 3 不同粒度景观组分结构

Fig. 3 Landscape component structure with different granular

指标(表 1)。随着粒度的增大,景观结构发生变化,景观格局指数也随之改变,到达某一粒度时,变化趋势可能会出现波动,特别是在临界值附近,景观格局指数对粒度的变化表现得非常敏感。斑块数和斑块密度随着粒度的增长,均呈现下降的趋势,且下降速度逐渐减缓,到 3 400 m 附近趋于稳定,说明在这一粒度水平下,大部分的细碎斑块已经被剔除,也很难合并出更大斑块,组分结构达到了一个比较稳定的状态。邻接比率、平均邻近距离、聚合度都随粒度增加而降低,且速度逐渐减慢,平均邻近距离在粒度为 1 600 m 后轻微波动,邻接比率与聚合度到 3 200 m 附近波动开始加剧。内聚力和分维度缓慢下降,粒

表 1　景观组分结构测定指标统计

Tab. 1　Statistics of indexes of landscape component structure of ecological sources

粒度/m	斑块数	斑块密度	邻接比率/%	内聚力/%	分维度	聚合度/%	平均邻近距离/m	连接度/%	连接度增加百分比/%
100	1 842	0. 264 1	90. 488 6	98. 948 7	0. 971 3	90. 656 8	228. 406 2	0. 034 0	0
200	1 933	0. 277 9	83. 250 5	98. 100 1	0. 966 3	83. 559 2	116. 422 0	0. 055 8	64. 117 6
300	1 636	0. 235 9	78. 253 6	97. 268 1	0. 965 2	78. 687 9	78. 481 1	0. 077 2	38. 351 3
400	1 288	0. 186 6	74. 789 1	97. 292 0	0. 937 1	75. 343 0	105. 180 7	0. 106 7	38. 212 4
500	1 027	0. 149 4	72. 196 4	96. 561 6	0. 940 4	72. 865 2	62. 948 4	0. 130 7	22. 493 0
600	812	0. 118 6	70. 043 1	96. 115 0	0. 939 5	70. 820 9	52. 464 0	0. 183 3	40. 244 8
700	689	0. 100 6	68. 428 6	95. 959 4	0. 926 9	69. 314 5	43. 569 3	0. 223 7	22. 040 4
800	579	0. 085 1	66. 964 7	95. 196 0	0. 930 1	67. 956 0	34. 577 7	0. 280 6	25. 435 9
900	489	0. 072 6	65. 508 5	94. 518 0	0. 934 4	66. 604 7	23. 498 5	0. 285 9	1. 888 8
1 000	442	0. 065 6	64. 449 1	93. 711 0	0. 935 4	65. 650 1	26. 316 2	0. 353 5	23. 644 6
1 100	378	0. 056 0	63. 964 1	92. 913 8	0. 942 5	65. 270 7	17. 166 0	0. 420 5	18. 953 3
1 200	333	0. 050 0	62. 573 0	91. 611 0	0. 947 7	63. 975 3	15. 324 3	0. 540 7	28. 585 0
1 300	288	0. 042 8	62. 471 7	91. 630 3	0. 942 9	63. 971 3	13. 138 0	0. 632 3	16. 941 0
1 400	264	0. 039 8	62. 056 7	91. 604 1	0. 937 1	63. 672 7	11. 127 8	0. 684 9	8. 318 8
1 500	234	0. 035 6	61. 002 7	90. 698 3	0. 938 8	62. 710 4	11. 114 3	0. 684 1	-0. 116 8
1 600	204	0. 031 4	59. 582 0	92. 267 1	0. 902 1	61. 379 5	11. 881 1	0. 830 9	21. 458 9
1 700	182	0. 028 0	59. 359 7	92. 735 7	0. 877 5	61. 277 2	16. 265 1	1. 086 6	30. 773 9
1 800	182	0. 027 7	58. 884 5	91. 837 7	0. 892 1	60. 858 5	11. 092 0	0. 939 5	-13. 537 6
1 900	153	0. 023 3	58. 998 3	92. 573 4	0. 871 5	61. 101 2	13. 452 6	1. 152 7	22. 692 9
2 000	138	0. 021 4	58. 395 3	89. 966 0	0. 917 5	60. 588 6	8. 688 4	1. 471 3	27. 639 5
2 100	126	0. 019 7	58. 906 5	90. 849 3	0. 899 0	61. 239 7	12. 632 9	1. 500 6	1. 991 4
2 200	123	0. 019 4	57. 322 7	89. 900 2	0. 903 8	59. 715 4	8. 233 7	1. 713 9	14. 214 3
2 300	104	0. 016 4	56. 969 9	90. 946 8	0. 883 4	59. 470 5	6. 230 8	1. 689 0	-1. 452 8
2 400	96	0. 015 4	57. 824 1	90. 590 0	0. 878 8	60. 509 2	8. 463 5	1. 819 2	7. 708 7
2 500	92	0. 014 5	56. 728 9	91. 815 8	0. 848 1	59. 384 6	5. 108 7	2. 127 7	16. 958 0
2 600	87	0. 013 8	56. 813 3	91. 037 7	0. 848 9	59. 609 4	8. 344 8	2. 553 2	19. 998 1
2 700	75	0. 012 0	56. 308 4	93. 789 2	0. 738 6	59. 226 1	8. 190 0	2. 196 8	-13. 959 0
2 800	85	0. 013 8	55. 661 6	89. 328 2	0. 868 3	58. 658 7	6. 111 8	2. 316 9	5. 467 0
2 900	77	0. 012 5	56. 054 4	90. 375 9	0. 832 0	59. 203 5	9. 801 9	2. 338 1	0. 915 0
3 000	63	0. 010 0	56. 294 7	91. 754 0	0. 815 3	59. 525 5	5. 976 2	2. 651 0	13. 382 7
3 100	69	0. 011 1	54. 102 2	90. 743 9	0. 823 5	57. 267 1	5. 876 8	2. 158 3	-18. 585 4
3 200	57	0. 009 2	57. 438 0	93. 187 5	0. 697 2	60. 914 8	6. 864 0	3. 525 0	63. 323 0
3 300	64	0. 010 6	56. 295 0	85. 978 3	0. 885 0	59. 764 3	5. 449 2	3. 216 8	-8. 743 3
3 400	59	0. 009 7	56. 072 1	85. 928 6	0. 886 9	59. 630 0	5. 317 8	3. 660 6	13. 796 3
3 500	64	0. 010 4	54. 600 0	87. 937 4	0. 828 9	58. 157 5	4. 062 5	2. 922 5	-20. 163 4
3 600	47	0. 007 8	55. 075 6	88. 711 5	0. 832 8	58. 973 0	2. 680 9	3. 553 3	21. 584 3
3 700	42	0. 007 0	56. 022 7	90. 433 2	0. 780 9	60. 025 7	4. 553 6	4. 210 5	18. 495 5
3 800	50	0. 008 2	56. 413 3	87. 918 3	0. 821 9	60. 494 0	5. 835 0	4. 471 5	6. 198 8
3 900	45	0. 007 6	53. 213 4	85. 536 4	0. 872 0	57. 295 3	3. 744 4	4. 381 4	-2. 015 0
4 000	37	0. 006 1	53. 149 6	88. 683 9	0. 806 1	57. 208 4	4. 783 8	5. 531 9	26. 258 7
4 100	43	0. 007 2	52. 974 5	88. 028 6	0. 807 7	57. 115 6	4. 930 2	4. 637 7	-16. 164 4
4 200	35	0. 005 9	55. 489 6	86. 280 0	0. 857 9	59. 937 6	4. 235 7	5. 194 8	12. 012 4

度大于 2 700 m 时,内聚力波动开始剧烈,出现多个明显的转折点,2 700、3 200 m 粒度处存在峰值,分维度则在粒度为 3 200 m 时达到最小值。连接度随粒度增长而上升,在粒度达到 3 200 m 时,出现一个峰值,其后波动幅度增大,此时连接度增加百分比达到了峰值,说明粒度为 3 200 m 时景观组分之间连接度较好,且粒度继续增大组分结构明显变化。

利用 R 语言对测定指标结果进行主成分分析,以寻找能够更加清晰地代表景观组分结构的指标构成以及能够产生最优结构的最优粒度。9 个指标中,由于斑块数主要代表生态源地数量特征且和斑块密度关联度较高,不列入分析范围;平均邻近距离和分维度与其他指标不同,数值越大代表景观结构整体性与稳定性越差,取相反数进行计算。根据方差贡献率统计(表 2),选定累积方差贡献率达到 0.837 9 的第 1、2 主成分进一步分析,达到降维的目的,得到主成分函数表达式

$$F_1 = 0.400C_1 + 0.411C_2 + 0.369C_3 - 0.299C_4 + 0.405C_5 - 0.369C_6 - 0.325C_7 + 0.199C_8 \quad (4)$$

$$F_2 = 0.134C_3 + 0.501C_4 + 0.352C_7 + 0.774C_8 \quad (5)$$

式中 F_1——主成分 1 F_2——主成分 2

C_1——斑块密度 C_2——邻接比率

C_3——内聚力 C_4——分维度

C_5——聚合度

C_6——平均邻近距离

C_7——连接度

C_8——连接度增加百分比

表 2 方差贡献率

Tab. 2 Total variance explained

	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 6	主成分 7	主成分 8
标准差	2.405 5	0.957 3	0.867 8	0.663 7	0.246 5	0.159 2	0.131 1	0.010 4
方差贡献率	0.723 3	0.114 6	0.094 1	0.055 1	0.007 6	0.003 1	0.002 1	0.000 1
累积方差贡献率	0.723 3	0.837 9	0.932 0	0.987 1	0.994 7	0.997 8	0.999 9	1

导入 mvstats 函数,将标准化数据代入主成分公式(式(4)、(5)),计算第 1、2 主成分得分与综合得分(图 4)。随着斑块的剔除与合并,景观逐渐离散化,综合得分整体呈下降趋势。粒度为 3 200 m 时综合得分出现峰值,明显高于周围粒度,说明景观格局变化累积到这一临界点出现质变,景观结构在这一粒度达到最优的极简状态,具有较好的整体连通性,选定 3 200 m 为反选生态源地的最优粒度。

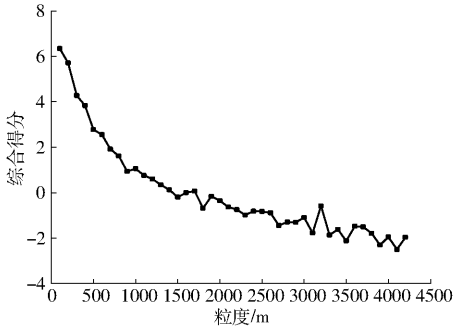


图 4 不同粒度下的景观组分结构综合得分

Fig. 4 Comprehensive score of landscape component structure with different granularity

将粒度为 3 200 m 的生态用地栅格图与原始土地覆盖分类结果进行叠加分析,景观组分结构在粒度为 3 200 m 时是 57 个斑块,为了保证源地的相对完整性,将其中 5 个景观斑块合并组成西拉沐沦河生态源地,3 个合并为老哈河生态源地,最终得到 51 个生态源地(图 5),面积共计 4 583.07 km^2,约占研究区总面积的 38.82%。翁牛特旗是一个半农半牧旗,西部中低山丘陵区主要表现为从典型草原到森林草原的过渡类型——疏林草原,分布有灯笼河牧场、小井子牧场等大型牧场,生态源地分布密集,占全部源地的 66.21%,耕地沿响水河、苇塘河等河流谷地分布,将源地分隔开,形成西部的源地结构。西拉沐沦河和老哈河交叉于大兴乡,翁牛特旗处在两河之间,境内主要的水域生态源地还有响水河以及红山水库。河间平原中部被广阔的沙地覆盖,东北角主要为农业发展区,研究区东部的生态源地主要为河边草地,分布相对零散。翁牛特旗生态源地整体呈现西部集中、东部分散、西拉沐沦河横贯全区北部和老哈河纵穿东南部的特点。

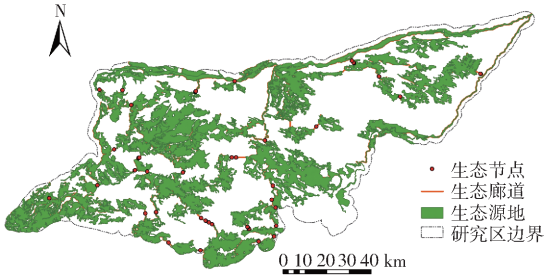


图 5 生态源地、生态廊道和生态节点分布

Fig. 5 Distribution of ecological sources, ecological corridors and ecological nodes

2.2 生态阻力面

采用 Natural Break 法划分因子等级,按照表 3 对各级生态因子赋值并叠加生成综合阻力面。翁牛特旗阻力分布存在明显差异,高程、坡度最大的中低

山丘陵区西南角以及沙地广布的中部平原是研究区生态阻力最高的两个区域；其余中低山丘陵区植被覆盖率较高，但高程、坡度大，阻力次之；水体作为生态服务价值最高的景观类型，在调节气候、净化环境等方面发挥重要作用，研究区阻力最低的区域基本围绕水体延伸。基于 MCR 模型构建最小累积生态阻力面（图 6），生态阻力在 0 ~ 371 236 之间。不同的生态阻力具有不同的生态功能，生态阻力低的区域有利于生态流的运行，能够缓冲外界对生态源地的干扰，稳定生态结构。高生态阻力区则会一定程度上阻断生态过程的发生，影响生态源地之间的连通，大力推进对应区域的生态建设将有效提高生态系统的抗干扰能力。

表 3　生态阻力因子评价体系

Tab. 3　Evaluation system of ecological resistance factor

一级因子	二级因子	分级标准	阻力
地形因子	高程/m	272 ~ 505	1
		505 ~ 716	3
		716 ~ 942	5
		942 ~ 1 280	7
		> 1 280	9
	坡度/(°)	0 ~ 2. 90	1
		2. 90 ~ 6. 40	3
		6. 40 ~ 11. 40	5
		11. 40 ~ 18. 74	7
		> 18. 74	9
土地覆盖	土地利用分类	水体	1
		林草地	3
		耕地	5
		建筑用地	7
		沙地	9
植被因子	NDVI	- 0. 24 ~ 0. 06	9
		0. 06 ~ 0. 20	7
		0. 20 ~ 0. 29	5
		0. 29 ~ 0. 40	3
		> 0. 40	1
水文因子	MNDWI	- 0. 70 ~ - 0. 27	9
		- 0. 27 ~ - 0. 23	7
		- 0. 23 ~ - 0. 18	5
		- 0. 18 ~ 0	3
		> 0	1
	地下水埋深/m	1. 77 ~ 2. 66	1
		2. 66 ~ 3. 21	3
		3. 21 ~ 3. 86	5
		3. 86 ~ 4. 71	7
		> 4. 71	9

2.3　生态廊道与生态节点

利用 Python 脚本调用 arcpy 模块计算得到生态廊道共 49 条（图 5），总长 3 379 km。大型水体是天然的生态廊道，西拉沐沦河、老哈河两大河流作为翁牛特旗的主要水域起到了贯通东西的纽带作用。西部中低山丘陵区的生态廊道集中连续，源地彼此连通，生态结构完整度较高。河间平原中部被沙地覆盖，是研究区生态阻力最高的区域之一，东北角主要为农业生产区，受人类活动影响较大，廊道需要克服较高的阻力才能实现连通，数量少且结构松散。沙地高阻力区的阻隔使得西拉沐沦河、老哈河成为东部源地连通的主要支撑，部分源地仅依靠一条廊道与其他源地相连，能量流动方向单一，一旦两大水系环境恶化，东部的生态结构就面临崩溃的风险。

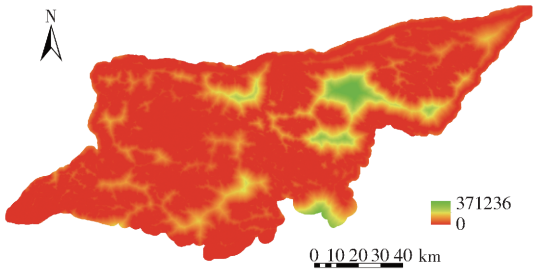


图 6　最小累积生态阻力面

Fig. 6　Ecological resistance surface

生态节点作为生态廊道中生态流运行的“关键点”，保障一定的节点数量以及合理的节点分布是生态规划的一项重要内容。研究区识别生态节点共 58 个（图 5），根据节点的景观基质，分为耕地生态节点 30 个，林地生态节点 8 个，草地生态节点 10 个，建筑用地生态节点 1 个以及沙地生态节点 9 个。针对不同类型的生态节点采取不同的建设措施，能够显著提高生态建设效率。研究区的耕地生态节点最多，占总数的 51. 72%，主要位于西部中低山丘陵地带沿河分布的耕地区，受人类活动影响非常大，生态结构单一，抗干扰能力差，若遭到破坏，会阻断西部生态流的运行，降低整体生态安全性。景观格局优化通过提取生态结构建设的“关键局部”，有针对地加强生态连通，保护生态脆弱点，实现格局整体功能的提升，改善区域系统稳定性。

2.4　密度分析

运用 ArcGIS 空间分析模块，对生态廊道与节点进行密度分析（图 7），得到生态廊道密度最大值为 1. 366 36，生态节点密度最大值为 0. 161 187。生态廊道密度最大的区域主要有 3 处，分别位于布力彦苏木、海拉苏镇北部附近区域，西北部的毛山东乡、分头地乡、四道账房乡附近区域，西南角的杨树沟门乡以及亿合公乡附近区域，这些区域是能量交互的重要中转区，风险等级低，生态措施应以保护为主。生态节点高密度区主要有西部的广德公镇、南部的解放营子乡、桥头镇以及东北部的白英套海苏木，这些区域的廊道密度大多居中，在发挥一定生态作用

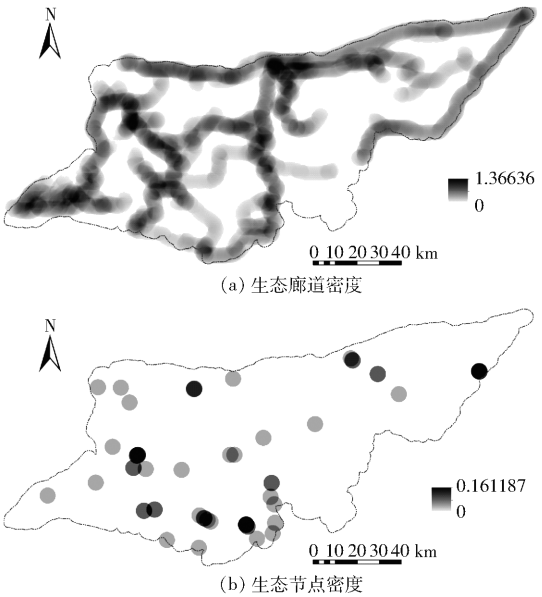


图 7 生态廊道及生态节点密度分布

Fig. 7 Ecological corridors and ecological nodes density distribution

的同时,生态状况比较复杂,极易受到外界环境的干扰,例如东北部白英套海苏木高密度区的节点所在廊道是老哈河与相邻草地生态源地之间的唯一通道,部分与该草地生态源地相连的源地也仅依靠这条通路实现能量物质流动,节点消失将会导致通路断裂,进而影响整个东北部的生态系统功能正常运行,因此保护建设节点区,特别是高密度节点区至关重要。

3 结论

(1)提取翁牛特旗林地、草地、水体 3 种景观类型斑块共 6 976.741 km^2,计算 42 个粒度水平下的测定指标,结合粒度反推法与主成分分析法识别 3 200 m 为最优粒度,反选生态源地 51 个。结果表明,粒度反推法模拟了生态系统不断简化的过程,在这个过程中,生态结构核心组分的功能逐渐凸显,生态斑块有向更大规模发展的趋势。粒度反推法结合景观整体性与连通性,展现了良好的区域适用性,可为源地的客观选取提供科学参考。

(2)选取生态阻力因子构建生态阻力面,提取生态廊道 49 条、生态节点 58 个,依据景观基质分为 5 类。结果表明,研究区生态状况并不平衡,西部廊道密集连续,源地互通良好,东部廊道孤立、节点零散,且对两大水系的依赖度过高,生态压力较大。

(3)通过密度分析,得到生态廊道密度最大值为 1.366 36,生态节点密度最大值为 0.161 187。结果表明,研究区存在 4 处生态节点高密度区、3 处廊道高密度区,密度分析能较好地细化廊道与节点特征,反映景观格局中的高、低风险区,依此规划生态建设的顺序和规模能够提高建设的精确度和效率。

参 考 文 献

[1] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J]. 生态学报,2013,33(5):1524 - 1534.
SU Yongxian, ZHANG Hongou, CHEN Xiuzhi, et al. The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(5):1524 - 1534. (in Chinese)

[2] ROSA D L, MARTINICO F. Assessment of hazards and risks for landscape protection planning in Sicily[J]. Journal of Environmental Management,2013,127(Supp.):155 - 167.

[3] FORMAN R T T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1995:42 - 45.

[4] SEPPELT R, VOINOV A. Optimization methodology for land use patterns-evaluation based on multiscale habitat pattern comparison[J]. Ecological Modelling,2003,168(3):217 - 231.

[5] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2001.

[6] 刘茂松,张明娟. 景观生态学——原理与方法[M]. 北京:化学工业出版社,2004:1 - 3.

[7] 刘杰,叶晶,杨婉,等. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化[J]. 自然资源学报,2012,27(5):801 - 808.
LIU Jie, YE Jing, YANG Wan, et al. Landscape pattern optimization of Dianchi Basin based on GIS[J]. Journal of Natural Resources,2012,27(5):801 - 808. (in Chinese)

[8] 张小飞,王仰麟,李正国. 基于景观功能网络概念的景观格局优化——以台湾地区乌溪流域典型区为例[J]. 生态学报,2005,25(7):1707 - 1713.
ZHANG Xiaofei, WANG Yanglin, LI Zhengguo. Landscape pattern optimization based upon the concept of landscape functions network: a case study in Taiwan, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(7):1707 - 1713. (in Chinese)

[9] 牛腾,岳德鹏,张启斌,等. 潜在生态网络空间结构与特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):166 - 175.
NIU Teng, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Spatial structure and characteristics of potential ecological networks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):166 - 175. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190819&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.019. (in Chinese)

[10] 何珍珍,王宏卫,杨胜天,等. 渭干河-库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化[J]. 生态学报,2019,39(15):5473 - 5482.
HE Zhenzhen, WANG Hongwei, YANG Shengtian, et al. Spatial - temporal differentiation and pattern optimization of landscape ecological security in the Ugan - Kuqa river oasis[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(15):5473 - 5482. (in Chinese)

[11] 傅强,宋军,毛锋,等.青岛市湿地生态网络评价与构建[J].生态学报,2012, 32(12):3670 - 3680.
FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al. Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(12):3670 - 3680. (in Chinese)

[12] FUB J, LIANG D, LU N. Landscape ecology: coupling of pattern, process and scale[J]. Chinese Geographical Science, 2011,21(4):385 - 391.

[13] WU J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations[J]. Landscape Ecology,2004,19(2):125 - 138.

[14] 吴未,范诗薇,许丽萍,等.无锡市景观指数的粒度效应研究[J].自然资源学报,2016,31(3):413 - 424.
WU Wei, FAN Shiwei, XU Liping,et al. Grain size effect of landscape metrics in Wuxi City[J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(3):413 - 424. (in Chinese)

[15] 包宇.深圳市景观指数的粒度效应分析及指数时空动态研究[D].武汉:武汉大学,2017.
BAO Yu. Particle size effect analysis and index temporal and spatial dynamics of landscape index in Shenzhen City[D]. Wuhan:Wuhan University,2017. (in Chinese)

[16] 施英俊,高健,雷亚君,等.阿尔泰山森林景观特征及其适宜粒度分析[J].西部林业科学,2019,48(1):63 - 69.
SHI Yingjun, GAO Jian, LEI Yajun,et al. Landscape characteristics and suitability analysis of the Altai mountains[J]. Journal of West China Forestry Science,2019,48(1):63 - 69. (in Chinese)

[17] 马丽娇. 基于景观连接度的河岸带植被格局优化[D].开封:河南大学,2016.
MA Lijiao. Optimization of riparian vegetation pattern based on landscape connectivity[D]. Kaifeng:Henan University,2016. (in Chinese)

[18] BUYANTUYEV A, WU J G, GRIES C. Multiscale analysis of the urbanization pattern of the Phoenix metropolitan landscape of USA: time, space and thematic resolution[J]. Landscape and Urban Planning,2009,94(3):206 - 217.

[19] PASCUAL-HORTAL L,SAURA S. Impact of spatial scale on the identification of critical habitat patches for the maintenance of landscape connectivity[J]. Landscape and Urban Planning,2007,83(2):176 - 186.

[20] 陆禹,佘济云,陈彩虹,等.基于粒度反推法的景观生态安全格局优化——以海口市秀英区为例[J].生态学报,2015, 35(19):6384 - 6393.
LU Yu, SHE Jiyun, CHEN Caihong,et al. Landscape ecological security pattern optimization based on the granularity inverse method: a case study in Xiuying District, Haikou[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(19):6384 - 6393. (in Chinese)

[21] 唐丽,罗亦殷,罗改改,等.基于粒度反推法和 MCR 模型的海南省东方市景观格局优化[J].生态学杂志,2016,35(12): 3393 - 3403.
TANG Li, LUO Yiyin, LUO Gaigai,et al. Landscape pattern optimization based on the granularity inverse method and MCR model in Dongfang City, Hainan Province[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(12):3393 - 3403. (in Chinese)

[22] 张子龙,王文全,缪作清,等.主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J].生态学杂志,2013,32(6):1636 - 1644.
ZHANG Zilong, WANG Wenquan, MIAO Zuoqing, et al. Application of principal component analysis in comprehensive assessmentof soil quality under *Panax notoginseng* continuous planting[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(6):1636 - 1644. (in Chinese)

[23] LI F,YE Y P,SONG B,et al. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: a case study from Changzhou, China[J]. Ecological Modelling,2015,318:194 - 203.

[24] 于强,杨斓,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. Investgation 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? flag=1&file_no=20180326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.026. (in Chinese)

[25] 陆禹. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化[D].长沙:中南林业科技大学,2014.
LU Yu. Landscape ecological security pattern optimization approach base on grain size reverse method [D]. Changsha:Central South University of Forestry Science and Technology,2014. (in Chinese)

[26] 申卫军,邬建国,任海,等.空间幅度变化对景观格局分析的影响[J].生态学报,2003,23(11):2219 - 2231.
SHEN Weijun, WU Jianguo, REN Hai, et al. Effects of changing spatial extent on landscape pattern analysis[J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(11):2219 - 2231. (in Chinese)

[27] YU Q,YUED P,WANG J P, et al. The optimization of urban ecological infrastructure network based on the changes of county landscape patterns: a typical case study of ecological fragile zone located at Dengkou (Inner Mongolia)[J]. Journal of Cleaner Production,2016,163(Supp.):54 - 67.

[28] 叶蕾. 基于 GIS 的城市生态廊道形态研究[D].重庆:重庆大学,2005.
YE Lei. Study of morphology of urban ecological corridor based on GIS[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)

[29] 姜磊.GIS 支持下景观格局优化关键技术研究[D].北京:北京林业大学,2012.
JIANG Lei. The research on key technologies of landscape pattern optimization based on GIS[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2012. (in Chinese)