

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.023

鄂尔多斯景观格局演变与景观生态网络优化研究

侯宏冰^{1,2} 郭红琼¹ 于强¹ 龙芊芊¹ 裴燕如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.中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄 050061)

摘要:以鄂尔多斯市为典型研究区,以2000、2005、2010、2015、2018年研究区景观格局数据和气象水文数据为研究素材,基于复杂网络理论、景观生态学和GIS空间分析技术,定量研究鄂尔多斯市景观格局的时空演变规律,并探究各级子流域的水源涵养深度,再将研究区景观格局演变数据和生态水文数据与由多个决定景观特征的因子构建的景观生态网络进行耦合分析,为研究区景观格局优化及生态环境建设提供参考。结果表明:在研究期内鄂尔多斯市的耕地不断减少,林地、草地、水域和建设用地均有一定程度的增加;景观演变主要是耕地、林地和水域之间的转化,林地、水体的景观演变最为剧烈,耕地、草地和建设用地相对平稳;鄂尔多斯地区整体水源涵养能力偏低,相对而言,东部地区的水源涵养能力高于西部地区,随着时间的推移,水源涵养深度高值逐渐南移;构建的鄂尔多斯市景观生态网络共342个生态节点,402条生态廊道,基于度低者优先的增边策略增加了119条廊道;优化后的网络连通度和连通鲁棒性均明显提升,网络中生态流更为畅通。

关键词:格局演变;水源涵养;景观生态网络;拓扑结构分析;空间结构优化

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)10-0205-08

OSID:



Analysis of Ordos Landscape Pattern and Spatial Optimization

HOU Hongbing^{1,2} GUO Hongqiong¹ YU Qiang¹ LONG Qianqian¹ PEI Yanru¹ YUE Depeng¹

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Ordos City was chosen as a typical study area, landscape pattern data and meteorological and hydrological data from 2000, 2005, 2010, 2015 and 2018 were taken as the study material. Based on complex network theory, landscape ecology and GIS spatial analysis technology, the spatial and temporal landscape pattern evolution of Ordos and the water sources depth in various sub-watersheds were quantitatively analyzed. The data of landscape pattern evolution and ecological hydrology were coupled with the landscape ecological network constructed according to the multiple factors that determined the landscape characteristics, which provided reference for the landscape pattern optimization and ecological environment construction in the study area. The results showed that arable land in Ordos City was decreasing, woodland, grassland, waters and building land was increased to some extent over the study period. Landscape evolution occurred mainly between arable land, woodland and waters, with the most dramatic landscape evolution occurring in woodland and waters, and it was relatively stable in arable land, grassland and building land. The overall water retention capacity of Ordos region was low, with the eastern region relatively stronger than the western region. Over time, the high values were gradually shifted southward. There were 342 ecological nodes and 402 ecological corridors in the Ordos landscape ecological network, with 119 corridors added based on the strategy of adding edges with the lowest priority. The optimized network connectivity and connectivity robustness were significantly improved, and the ecological fluidity in the network was smooth.

Key words: landscape evolution; water conservation; landscape ecological network; topological structure analysis; spatial structure optimization

收稿日期:2020-07-03 修回日期:2020-08-04

基金项目:衢江流域水文地质调查项目(DD20190356)和国家重点研发计划项目(2018YFC0507303)

作者简介:侯宏冰(1976—),男,博士生,中国地质科学院研究员,主要从事水文地质和生态地质研究,E-mail: hongbinghou@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

0 引言

目前,全球面临最大的环境问题之一是土地沙漠化(砂质荒漠化)^[1]。中国是世界上受沙漠化影响最大的国家之一,沙漠以及沙漠化土地面积约173.97万 km², 占国土面积18%以上^[2],土地沙漠化严重制约着区域社会经济可持续发展和国家整体发展计划的实施。我国沙漠化地区主要位于北方,而北方沙漠化地区同时也是农牧交错带主要分布区域。交错带是一种脆弱而敏感的生态系统,在群落迁移、结构与功能时空变化的速率和方向以及抵抗外部干扰的能力上具有相对不稳定性与易变性,同时是两种系统之间物质、能量和信息流动与交换最为频繁的区域,它维系着区域的生态安全^[3-6]。沙漠化加剧和逆转的过程是景观结构在人为和自然因素的共同作用下遭遇破坏和进行修复的过程^[7]。水是生态系统构成、发展和稳定的基础,干旱半干旱区的水资源在抑制荒漠化、保护生物多样性以及为人类提供良好的生存环境等方面具有显著的生态意义^[8-11]。通过研究景观格局在时空尺度上的异质性及演变情况、土地水源涵养能力和涵养深度,可以量化表达景观结构和功能的具体变化以及地区土地的水资源情况,从而对有效控制沙漠化和保护区域环境可持续发展提出更多的可行性建议,保障区域生态安全,维护景观格局内部的稳定性。

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区的西南部,横跨干旱、半干旱和半湿润过渡带,内含库布齐沙漠和毛乌素沙地,降水稀少,植被覆盖率低。该地区生态系统自我修复能力较弱、自然恢复时间较长,加之近年来人类活动频繁,其生态环境质量日趋下降,是土地

沙漠化的典型区域^[12-13]。荒漠化防治不仅有利于维护当地生态系统稳定,同时也有助于经济的可持续发展^[14-15]。本文通过研究沙漠化典型区域的景观格局动态,把握景观功能及结构的变化情况,探究作为影响荒漠化和景观格局变化的重要因素之一的水源涵养功能,将景观格局演变数据和生态水文数据与根据多个决定景观特征的因子构建的景观生态网络进行耦合分析,从而评价和分析荒漠化地区的景观格局,为景观格局优化及生态环境建设提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区西南部,地处鄂尔多斯高原腹地,介于北纬37°35'24"~40°51'40",东经106°42'40"~111°27'20"之间,东西长约400 km,南北宽约340 km,总面积86 752 km²(图1)。鄂尔多斯市地势起伏不平,西北高东南低,地形复杂,东北西三面被黄河环绕,南与黄土高原相连,地貌类型多样,有草原和高原;鄂尔多斯市境内共有五大类型地貌,平原约占总土地面积4.33%,丘陵山区约占总土地面积18.91%,高原约占总土地面积28.81%,毛乌素沙地约占总土地面积28.78%,库布其沙漠约占总土地面积19.17%。鄂尔多斯市属北温带半干旱大陆性气候区,冬夏寒暑变化大。多年平均气温6.2℃,日最高气温38℃,日最低气温-31.4℃。多年平均降水348.3 mm,降水多集中于7~9月,占全年降水量的70%左右。多年平均蒸发量2 506.3 mm,为降水量的7.2倍,以5~7月为最大。全年多盛行西风及北偏西风,年平均风速3.6 m/s,最大风速可达22 m/s。

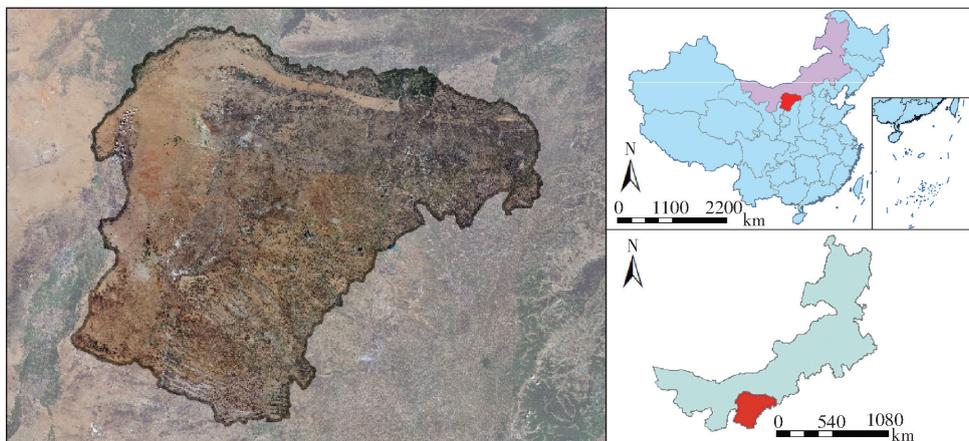


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of research area

1.2 数据来源与处理

采用的数据包括景观格局数据、高程数据、生态水文数据、气象数据及道路和河流分布数据。

研究区景观格局数据、归一化植被指数(NDVI)、气象数据来源于资源环境云平台(<http://www.resdc.cn/>),各类数据的选取时间为2000、

2005、2010、2015、2018 年。生态水文数据通过实地调查遥感勘探取样,通过反演推算获取。高程来自地理空间数据云的 ASTER GDEM 数据集,分辨率为 30 m 的栅格图像格式,从中提取坡度。道路和河流分布数据来自 OpenStreetMap (<http://www.openstreetmap.org/>)。

1.3 方法

1.3.1 景观格局动态度

景观格局动态度可以量化景观格局在时空尺度上的演变速率^[16]。其数值越低,景观格局越稳定;数值越大,景观的变化程度越剧烈。单一景观格局动态度和综合景观格局动态度,计算式为

$$K = \frac{S_b - S_a}{S_a T} \times 100\% \quad (1)$$

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta S_{i-j}}{2T \sum_{i=1}^n S_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 K ——研究区内某一景观格局的动态度

S_a 、 S_b ——研究初期与末期该景观格局面积

T ——研究时间段的周期

Z ——研究区综合景观格局动态度

ΔS_{i-j} ——第 i 类景观转换为第 j 类景观面积总和的绝对值

S_i ——研究初期第 i 类景观的面积

1.3.2 水源涵养深度

水源涵养深度利用具有模型参数和特性数据要求低、全球通用等优势 InVEST 模型来评估,该模型中的产水模块基于水量平衡原理,计算实际蒸散发量和产水量^[17]。产水量包含林冠层截流量、枯枝落叶层持水量、土壤含水量及地表和地下径流量,其计算公式为

$$Y_{jx} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_{xj}}\right) P_{xj} \quad (3)$$

式中 Y_{jx} ——栅格单元的年产水量

P_{xj} ——第 j 类土地上栅格单元 x 的年降雨量

AET_{xj} ——年际潜在蒸散发量

1.3.3 景观生态网络提取、分析与优化

景观生态网络提取包括生态源地、生态累积阻力面和生态廊道。选取林地、草地、水体 3 种景观类型斑块,采用各斑块面积、平均 NDVI/MNDWI 值和斑块形状指数综合评价各斑块的重要性^[18],选取前 60% 的斑块作为生态源地。生态累积阻力面利用最小累积耗费阻力模型(MCR)构建,模型中使用的阻力系数根据地形因子(高程、坡度)、植被因子(NDVI)、水文因子(MNDWI)、景观格局分布、密度

因子(居民点、道路、水网)8 个因子,通过栅格相加运算得到。MCR 模型一般形式为

$$R_{mc} = f_{\min} \sum D_{ij} R_i \quad (4)$$

式中 R_{mc} ——最小累积阻力

f_{\min} ——未知负函数,表示最小累积阻力与传播或者扩散过程的负相关关系

D_{ij} ——从源 i 到景观单元 j 的空间距离

R_i ——景观单元对传播及扩散过程的阻力系数

生态廊道是景观生态流从某一生态源地经生态累积阻力面到另一源地的最小成本路径,生态节点包括两类:源地型生态节点和薄弱型生态节点,前者由提取生态源地的空间分布质心得到,后者是生态累积阻力面的“山脊线”与生态廊道的交点^[19]。

干旱地区的廊道较少且极为重要,因此鄂尔多斯市网络的优化不适合通过破坏其廊道来实现^[20],结合研究区的景观格局演变和水源涵养状况,本文在景观格局变化不剧烈、水源涵养深的地区采用基于度低者优先的增边策略优化景观生态网络^[21]。对于网络的分析,选取无向无权网络的常用指标:基本静态统计特征、节点重要性和网络连通性分析鄂尔多斯市景观生态网络的拓扑结构;采用连接鲁棒性评价网络在遭到破坏后的连接能力,计算式为

$$R = \frac{C}{N - N_r} \quad (5)$$

式中 R ——网络的连接鲁棒性

C ——最大连通子图中节点的数量

N ——网络节点总数

N_r ——被移除的节点数目

2 结果与分析

2.1 鄂尔多斯市景观格局演变分析

鄂尔多斯市景观类型以中覆盖度草地、沙地为主,其次是低覆盖度草地和高覆盖度草地。2000—2015 年这 4 种景观类型的占比变化不大,分别为 26%、24%、20% 和 14%,2015 年发生了较大变化,分别变成 31%、23%、20% 和 11%。鄂尔多斯市 2000—2018 年间的单一景观动态度与综合景观动态度如表 1 所示。2000—2005 年间,鄂尔多斯市综合景观动态度为 -48.02%,其他建设用地、城镇用地和河渠的单一景观动态度分别为 15.24%、12.59% 和 8.13%,表明此期间鄂尔多斯市建设力度较大;2005—2010 年间,鄂尔多斯市综合景观动态度仅为 2.84%,单一景观动态度最大为 -3.69%,说明鄂尔多斯市内景观格局在此期间基本没有变化;2010—2015 年间,鄂尔多斯市综合景

表1 景观动态度指标

景观类型	Landscape dynamics indicators				%
	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2018年	2000—2018年
旱地	-0.07	0.02	-0.38	0	-0.12
有林地	6.22	-0.10	4.01	-7.20	1.27
灌木林	1.43	-0.04	-1.85	-3.13	-0.65
疏林地	2.37	0	2.60	-4.15	0.56
其他林地	-0.41	-2.08	-1.40	-20.00	-3.74
高覆盖度草地	0.01	-0.01	0.33	-7.74	-1.22
中覆盖度草地	-0.10	0.05	-0.05	6.16	0.99
低覆盖度草地	-1.14	0.10	0.06	0.79	-0.15
河渠	8.13	-0.35	1.77	-0.75	2.62
湖泊	-2.56	-3.69	-0.17	-9.14	-2.71
水库坑塘	0.92	-0.44	0	34.58	6.02
滩地	-2.44	1.26	-0.40	-3.37	-0.99
城镇用地	12.59	0.23	8.31	67.20	33.54
农村居民点	0.56	-0.03	0.35	-1.29	0.02
其他建设用地	15.24	2.70	93.65	13.97	84.04
沙地	0.64	-0.08	-0.82	-1.77	-0.37
戈壁	0	0	0	2.08	0.35
盐碱地	0.30	-0.59	-0.36	-8.32	-1.52
沼泽地	3.12	0.19	-0.23	-3.96	0.09
裸土地	2.98	0	-0.74	-6.41	-0.59
裸岩石质地	0.23	0	-0.69	17.36	2.70
综合景观动态度	-48.02	2.84	-103.99	-64.92	-120.14

观动态度飙升至 -103.99%，仅其他建设用地的单一景观动态度就为 93.65%，表明鄂尔多斯市在此期间增加了大量的其他建设用地；2015—2018年

间，鄂尔多斯市综合景观动态度为 -64.92%，单一景观动态度最大的是城镇用地、水库坑塘和其他林地，分别为 67.20%、34.58%、-20.00%，说明在此期间鄂尔多斯市城镇建设依然较多，但幅度大为减少，同时也增加了水域。整体来看，鄂尔多斯市2000—2018年的综合景观动态度为 -120.14%，城镇用地与其他建设用地的单一景观动态度较大，分别为 33.54%与 84.04%。

研究时间段内，鄂尔多斯市景观演变密度分析结果如图2所示。由图可知，2000—2005年间，鄂尔多斯市西北部与东南部部分地区变化较为明显，其中西北部的杭锦旗变化最明显，东南部的伊金霍洛旗和乌审旗部分地区也有较明显变化；2005—2010年间，鄂尔多斯市整体变化差距不大，中部东胜区和西南部鄂托克前旗有部分区域变化相对明显；2010—2015年间，鄂尔多斯市东部和西南部有部分地区存在相对明显的变化，但变化最明显的区域还是杭锦旗内部；2015—2018年间，鄂尔多斯市北部较南部变化更明显，变化最明显的区域出现在北部的达拉特旗内。整体来看，2000—2018年间，鄂尔多斯市东北部较其他地区的变化更明显，主要分布在达拉特旗和准格尔旗内，最明显的还是在达拉特旗内。景观变化较为剧烈的地区，生态环境不太稳定，不适宜在此地进行生态建设。

2.2 鄂尔多斯景观水源涵养能力分析

针对鄂尔多斯干旱少雨的气候条件和荒漠化现

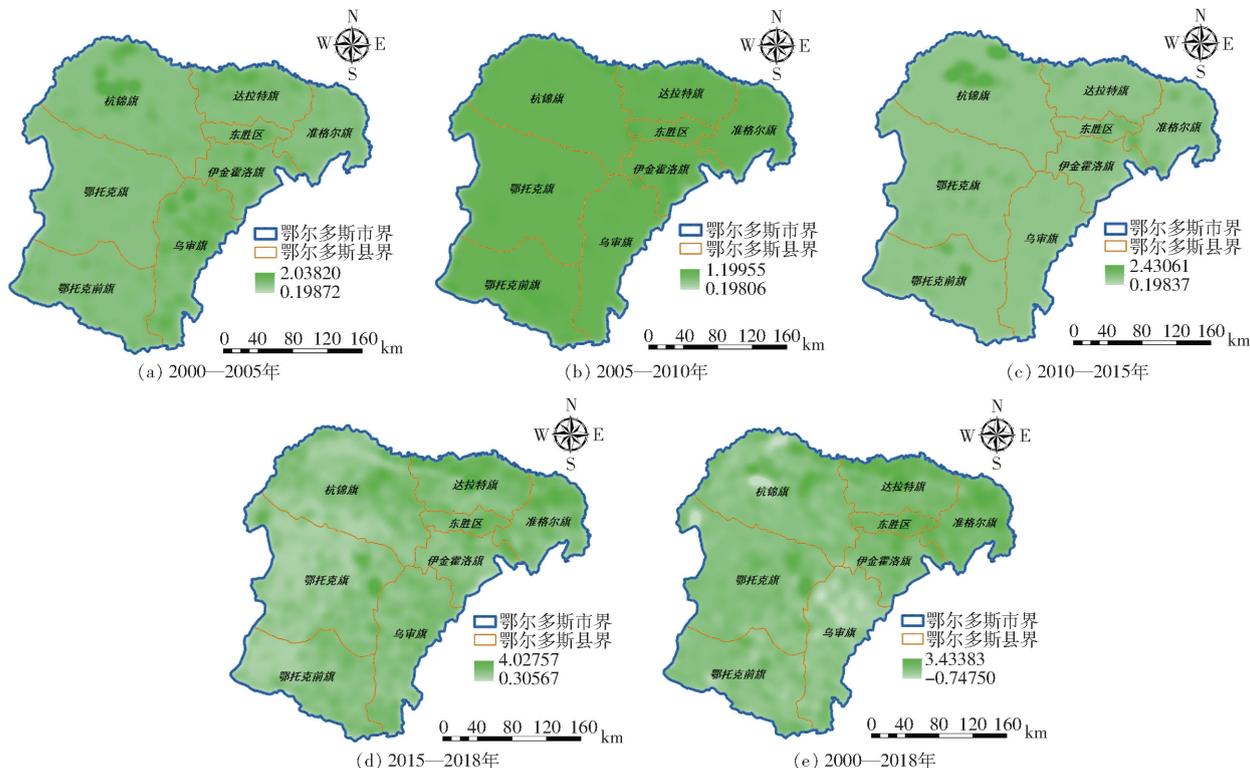


图2 鄂尔多斯市景观演变密度分析

Fig.2 Density analysis

状,基于降雨量、潜在蒸散发和各类反映下垫面性质的地学数据分析鄂尔多斯地区 2000、2005、2010、2015、2018 年的水源涵养时空变化情况,鄂尔多斯 2000—2018 年的水源涵养能力总体呈上升趋势,2010 年前后形成明显差别。探究研究区内部水源涵养能力的差异需要对其空间分布情况进行分析,水源涵养的基础是子流域,子流域在 DEM 提取出的地区河网上进行划分。将鄂尔多斯市划分为 78 个子流域(图 3)。

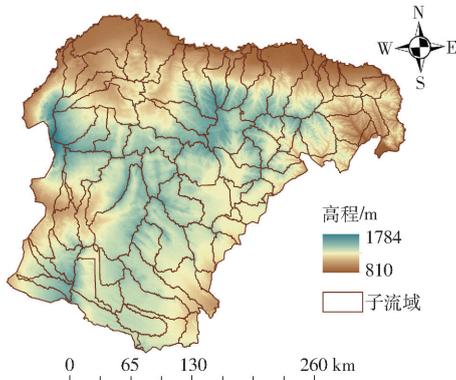


图 3 鄂尔多斯市子流域

Fig. 3 Ordos subbasin

在子流域划分的基础上,分析得到鄂尔多斯市水源涵养深度空间分布(图 4),可以看出,鄂尔多斯市 2000、2005、2010、2015、2018 年的水源涵养分布情况基本相似,各子流域的水源涵养量分布十分不均,自东向西呈递减趋势。其中,2000 年和 2005 年,鄂尔多斯市水源涵养总量偏低,水源涵养高值集

中在东北部的子流域,特别是 2005 年,几乎呈放射状自东北向西南递减;2010、2015 年,水源涵养深度高值逐渐南移,但总体仍然保持东高西低的态势;2018 年,高值区南移的现象更为明显,此外,在北部偏中区域,首次出现了水源涵养深度高值区。水源涵养深度较高的地方更有潜力提供植被生长所需水源,适宜在此进行生态建设。

2.3 鄂尔多斯市景观生态网络优化

2.3.1 景观生态网络构建与优化

根据研究区景观类型分布数据,提取研究区内林地、草地和水体 3 种用地类型,计算各斑块面积、斑块形状指数、NDVI/MNDWI,并用熵值法确定各指标权重,最终识别出 199 块生态源地。其中,草地是面积最大的源地类型,共 61 块斑块,高、中、低覆盖度草地面积分别是 747、17 521、5 142 km²,高、中覆盖度草地主要集中分布在鄂尔多斯市西部,低覆盖度草地分布在其周围;林地生态源地总面积为 514.76 km²,在北部和东部有零星分布;水体生态源地除集中分布在沿黄河段和孔兑河段外,东部和南部也有零星分布。综合考虑高程、坡度、NDVI、MNDWI、土地利用类型、水网密度、路网密度、居民点密度 8 个因子的阻力,利用 MCR 模型生成研究区生态最小累积耗费阻力面(图 5),研究区生态累积阻力最大值为 1 181 545,阻力高值主要出现在北部的库布齐沙漠以及杭锦旗东部、乌审旗北部的沙地中,这些区域生态环境状况较为恶劣,且远离生态源

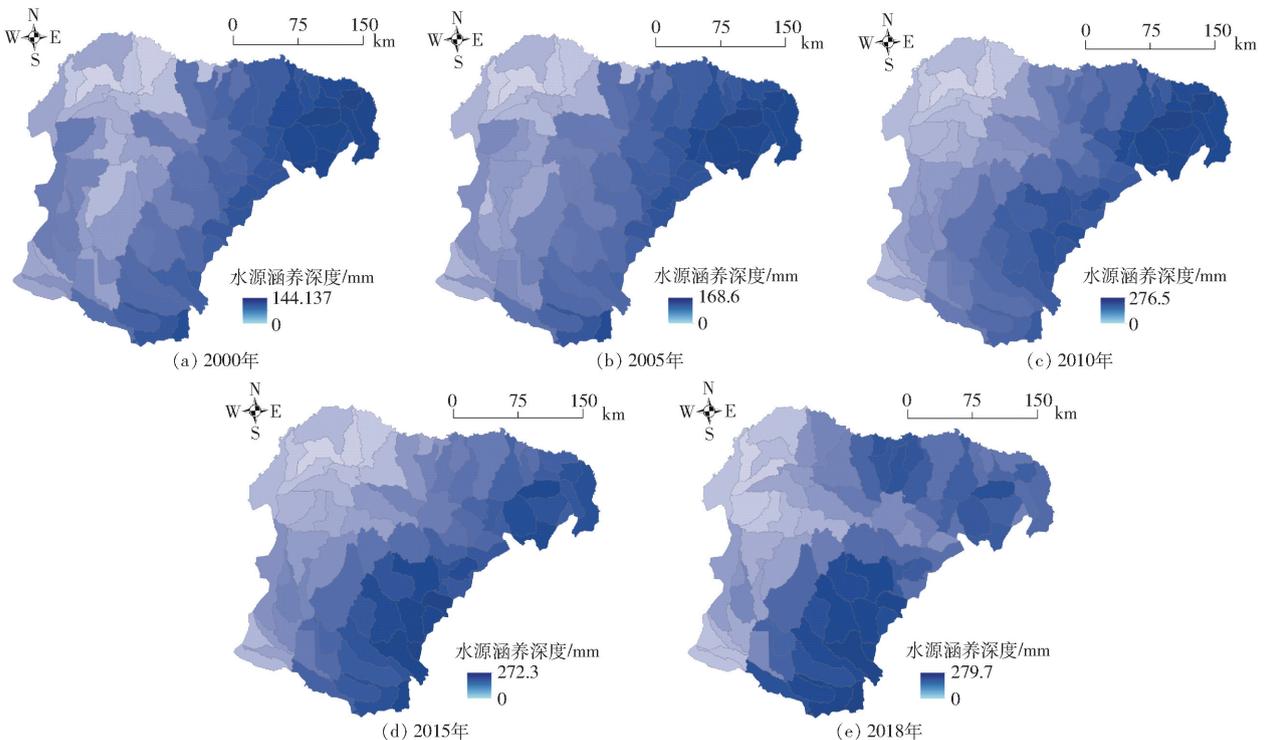


图 4 水源涵养深度空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of water conservation depth

地,生态阻力的累积作用较为明显。

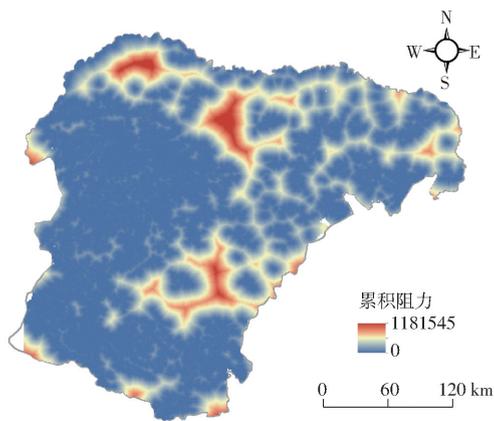


图5 研究区生态累积阻力面

Fig. 5 Ecological accumulation resistance surface in study area

基于生态源地以及最小累积阻力面,在研究区内共提取出 19 701 条潜在生态廊道,对重叠路径进行处理后,得到源地间直接相连的 402 条生态廊道,在此基础上利用水文学方法分析得到薄弱型生态节点 143 个,生态源地、生态廊道和薄弱型生态节点共同构成鄂尔多斯市景观生态网络(图 6a)。可以看出,整个鄂尔多斯的景观生态网络分成东西两部分。东部网络位于达拉特旗、东胜区、准格尔旗、伊金霍洛旗以及乌审旗的北部,城区多集中在此区域,交通便利、植被覆盖度较高,生态廊道较为丰富;西部生态网络中草地源地面积较大,水体源地面积较小,同类型源地间连接紧密,廊道丰富,北端的水体和南端的草地廊道被库布齐沙漠阻隔。连接东西两部分生态网络的生态源地有两处,一处是位于北部黄河的 177 号水体源地,另一处是位于乌审旗北端的 31 号草地源地。此外,除了 3 个阻力高值区域有大片生态廊道的空白外,鄂尔多斯东西部的生态交错区都有程度不同的廊道空白区,由此可见,鄂尔多斯地区景观生态网络中生态流常常受阻,生态功能得不到

很好发挥,亟需优化。各个生态系统想要发挥其相应的生态功能,需要系统健康、生态流畅通。鄂尔多斯市当前的景观生态网络存在较多的廊道空白区域,生态流常常受阻,结合前文的景观格局演变和水源涵养分析,在生态阻力不高、廊道缺乏、景观格局变化不大、水源涵养较高的地区,采用度低者优先的增边策略对网络进行优化,设置增边数量为现有廊道数的 30%,即 119 条,以寻求鄂尔多斯市景观生态网络的生态服务功能最大化。优化后的景观生态网络如图 6b 所示。

2.3.2 景观生态网络优化效果验证

从对比优化前后网络拓扑结构和鲁棒性两方面入手,将生态源地空间质心和薄弱型生态节点共同作为复杂生态网络的节点,生态廊道作为复杂生态网络的边,并用邻接矩阵表示。网络拓扑结构分析结果表明,优化后网络的平均度由 2.350 9 增加到 3.046 8,直径降低了 22,平均路径长度降低,聚类系数增加,同配性系数也降低了 0.025 2,说明优化后的网络连通性明显提高,小世界特性更明显,网络虽仍呈现异配性,但程度降低,更利于节点间物质、能量与信息的交换。如图 7a、7d 所示,优化前后网络都不存在度为 0 的节点,度分布也都是幂律分布特征更明显,但优化后网络有轻微的 Poisson 分布特征,说明优化后网络无标度性特征依然要强于均匀性特征但程度有所缓解;度为 1、2 的节点减少,节点数量最多的度从 2 上升到 4,度最大值都为 72,表明大部分节点度都有所提升,网络连通性增加。如图 7b、7e 所示,优化前的网络中有 77.78% 的节点介数为 0,除 54 号斑块介数为 1 419 外,其余节点介数都小于 150;而优化后网络中介数为 0 的节点只占 55.56%,介数大于 150 的节点占总节点数的 21.64%,介数在 1 000 以上的有 14 个,54 号斑块介数最大,为 3 986,表明优化后网络中的重要节点增

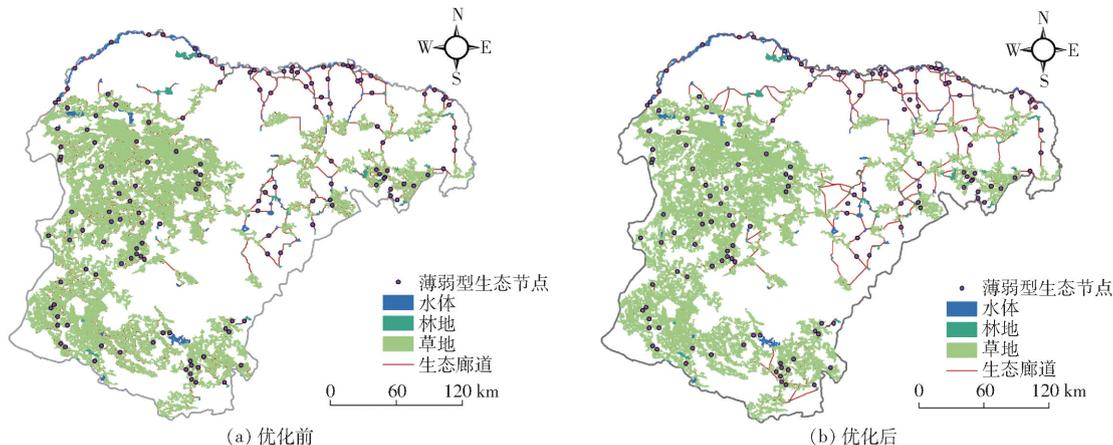


图6 鄂尔多斯市景观生态网络

Fig. 6 Landscape ecological network of Ordos City

多,重要性增加,网络更加稳定。如图 7c、7f 所示,优化前网络中 83.04% 的生态节点连通度低于 10,其余节点连通度在 25~28 之间;而优化后的网络只

有 64.04% 的节点连通度低于 25,其余节点连通度都高于 35,最高为 106,表明优化后网络的连通度明显增强,网络生态流远远比优化前畅通。

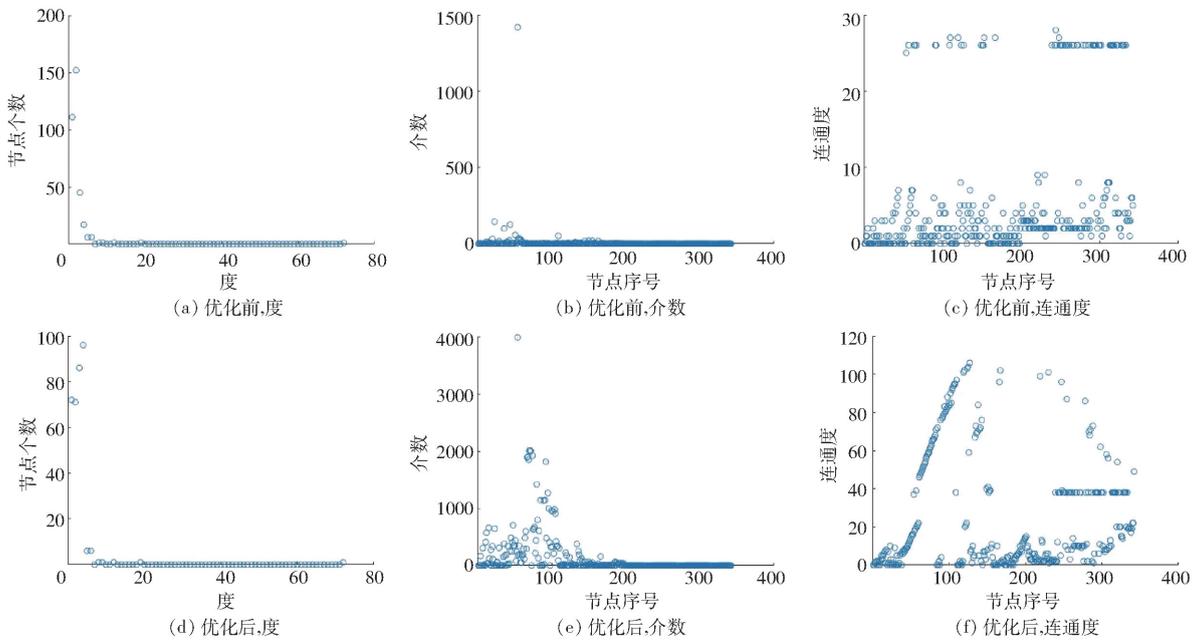


图 7 优化前、后景观生态网络的拓扑结构

Fig. 7 Topological structure of unoptimized and optimized landscape ecological network

使用恶意和随机两种策略分别攻击优化前后的网络,并分析随攻击力度加大,网络连接鲁棒性的变化情况。结果表明,优化前网络的初始连接鲁棒性仅为 0.97,优化后增加到 1(图 8),说明优化后网络结构稳定,连通能力强。随攻击规模的增加,网络的连接能力迅速下降,但总体来说,随机攻击优于恶意攻击,优化后网络的情况更好,恶意攻击下,优化前网络在去除到第 2 个节点时就已出现“涌现”现象,网络的连接鲁棒性急剧下降至 0.45,而优化后才降低到 0.89;优化前网络在去除节点数增加到 14 个

时,连接鲁棒性就已经降至 0.2,而优化后网络却是攻击到 178 个节点;优化前网络在去除 159 个节点,优化后网络在去除 199 个节点时,连接鲁棒性几乎完全丧失。随机攻击下,优化前网络连接鲁棒性在去除 24 个节点时骤降至 0.48,优化后网络攻击节点数在 20 个以内时,网络连接性还能完全恢复;优化前网络去除节点数到 156 时,连接鲁棒性降低到 0.1 以下,优化后网络攻击节点数达到 300 个,连接鲁棒性依然在 0.2 左右。表明优化后的景观生态网络因为廊道增多,节点度增加,连通能力和稳定性都有了很大幅度的提升。

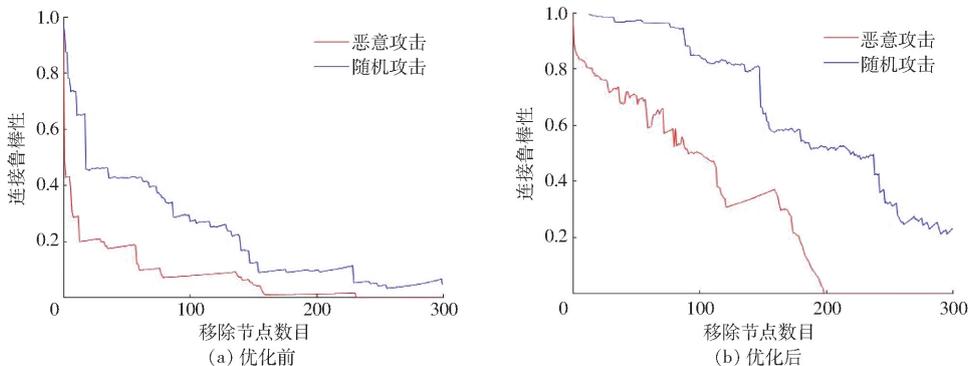


图 8 景观生态网络的连接鲁棒性

Fig. 8 Connection robustness of landscape ecological network

3 结论

(1) 鄂尔多斯市景观类型以草地、裸地为主。在研究期内,耕地不断减少,林地、草地、水域和建设用地均有一定程度的增加,其中林地、水体的景观演

变最为剧烈,耕地、草地和建设用地相对平稳,核密度分析表明,变化最为明显的地区是泰来县、昂昂溪区和铁峰区。

(2) 鄂尔多斯市整体水源涵养能力偏低,主要原因是该地区气候条件干旱、蒸散发强度较大。

2010年以后,鄂尔多斯市潜在蒸散发减弱、降雨增加,使全区水源涵养能力有明显提高。相对而言,东部地区的水源涵养能力高于西部地区,随着时间的推移,水源涵养深度高值逐渐南移,2018年首次在北部偏中区域出现了水源涵养深度高值区。

(3)根据多个决定景观特征的因子构建的鄂尔

多斯市景观生态网络有342个生态节点、402条生态廊道,在景观演变不剧烈、水源涵养深度高、生态阻力低的地区,利用度低者优先的增边策略,增加119条生态廊道,对景观格局网络进行优化,优化后的网络节点连通度和连接鲁棒性均明显增加,网络中的生态流更为畅通。

参 考 文 献

- [1] HU Yunfeng, HAN Yueqi, ZHANG Yunzhi. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 180: 104203.
- [2] 冰华. 沙漠化和盐碱化[J]. 防灾博览, 2019(2): 64-65.
BING Hua. Desertification and salinization[J]. Disaster Prevention Expo, 2019(2): 64-65. (in Chinese)
- [3] 杜艺, 邢鹏飞, 贾镇宁, 等. 北方农牧交错带赖草草地斑块的土壤化学计量特征对植物多样性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 808-814.
DU Yi, XING Pengfei, JIA Zhenning, et al. The influence of soil stoichiometry characteristics of *Leymus chinensis* grassland patches on plant diversity in the northern agropastoral zone[J]. Acta Grassland, 2020, 28(3): 808-814. (in Chinese)
- [4] 张凯, 马明. 内蒙古农牧交错带山地聚落空间形态研究[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(6): 165-170.
ZHANG Kai, MA Ming. Research on the spatial morphology of mountain settlements in the interlock zone of agriculture and animal husbandry in Inner Mongolia[J]. Regional Research and Development, 2019, 38(6): 165-170. (in Chinese)
- [5] 聂雯雯. 退耕还林政策影响下农林生态系统交错带动态变化[D]. 昆明: 云南大学, 2015.
NIE Wenwen. Dynamic changes in the agro-forestry ecosystem under the influence of the policy of returning farmland to forests [D]. Kunming: Yunnan University, 2015. (in Chinese)
- [6] 马艳艳, 东梅. 生态脆弱区农户秸秆资源化利用行为选择及影响因素分析——以宁夏同心县丁塘镇农户调查为例[J]. 生态经济, 2020, 36(6): 118-123.
MA Yanyan, DONG Mei. Farmers' straw resource utilization behavior selection and influencing factors analysis in ecologically fragile areas: a case study of farmers in Dingtang Town, Tongxin County, Ningxia[J]. Ecological Economy, 2020, 36(6): 118-123. (in Chinese)
- [7] 于强, 岳德鹏, 张启斌, 等. 磴口县荒漠绿洲景观时空演变及其格局特征分析[J]. 生态科学, 2016, 35(6): 73-83.
YU Qiang, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Analysis on the temporal and spatial evolution and pattern characteristics of desert oasis landscape in Dengkou County[J]. Ecological Sciences, 2016, 35(6): 73-83. (in Chinese)
- [8] 王爱玲, 李奇峰, 串丽敏. 北京市水资源生态安全与农业安全状态评价[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 85-89.
WANG Ailing, LI Qifeng, CHUAN Limin. Evaluation of water resources ecological security and agricultural security status in Beijing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(3): 85-89. (in Chinese)
- [9] 陈正雷, 陈星. 山东省水生态足迹时空分布与驱动效应研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 76-80.
CHEN Zhenglei, CHEN Xing. Research on the spatial and temporal distribution and driving effects of water ecological footprint in Shandong Province[J]. People's Yellow River, 2020, 42(4): 76-80. (in Chinese)
- [10] 胡宝华, 晁伟鹏, 喻晓玲. 干旱区水资源承载力空间布局研究——以新疆为例[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(8): 1093-1098.
HU Baohua, CHAO Weipeng, YU Xiaoling. Research on the spatial distribution of water resources carrying capacity in arid areas: taking Xinjiang as an example[J]. Resource Development and Market, 2018, 34(8): 1093-1098. (in Chinese)
- [11] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493.
WANG Yujie, QIN Dahe. Summary of research on the impact of climate change and human activities on water resources in the arid area of Northwest China[J]. Progress in Climate Change Research, 2017, 13(5): 483-493. (in Chinese)
- [12] 郝晨曦, 焦琳琳, 王文佩, 等. 基于RS和GIS技术的准格尔旗沙漠化动态监测分析[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 21-25.
HAO Chenxi, JIAO Linlin, WANG Wenpei, et al. Dynamic monitoring and analysis of desertification in Jungar Banner based on RS and GIS technology[J]. Journal of North China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 41(3): 21-25. (in Chinese)
- [13] 赵志荣, 许端阳, 张绪教, 等. 2000—2015年内蒙古地区土地沙漠化脆弱性评估[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 168-175.
ZHAO Zhirong, XU Duanyang, ZHANG Xujiao, et al. Assessment of the vulnerability of land desertification in Inner Mongolia from 2000 to 2015[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 168-175. (in Chinese)
- [14] KHEIRFAM H, FARROKH A. Stabilizing sand from dried-up lakebeds against wind erosion by accelerating biological soil crust development[J]. European Journal of Soil Biology, 2020, 98: 103189.

- Environment, 2009, 42(29): 6915–6925.
- [17] LING Y I, XIONG L Y, YANG X H. Method of pixelizing GDP data based on the GIS[J]. Journal of Gansu Sciences, 2006, 18(2): 54–58.
- [18] LIU H, JIANG D, YANG X, et al. Spatialization approach to 1 km grid GDP supported by remote sensing[J]. Geo-information Science, 2005, 7(2): 120–123.
- [19] RUDOLF S De G, ROB A, LEON B, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making[J]. Ecological Complexity, 2010, 7(3): 260–272.
- [20] BROWN M, CLARKSON B, BARTON B, et al. Implementing ecological compensation in New Zealand: stakeholder perspectives and a way forward[J]. Journal Royal Society of New Zealand, 2014, 44(1): 34–47.
- [21] CUPERUS R, BAKERMANS M M G J, HAES H A U D, et al. Ecological compensation in dutch highway planning[J]. Environmental Management, 2001, 27(1): 75–89.
- [22] MEINER E, DEVILLE A S, GRÉMILLE T, et al. Combining correlative and mechanistic habitat suitability models to improve ecological compensation[J]. Biological Reviews, 2015, 90(1): 314–329.
- [23] MENG Y, LIU M, GUAN X, et al. Comprehensive evaluation of ecological compensation effect in the Xiaohong River Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(8): 7793–7803.
- [24] 张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 2000年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 259–266.
- ZHANG Renjian, WANG Mingxing, PU Yifen, et al. Analysis of chemical and physical properties of the super dust storm in Beijing in 2000[J]. Climatic And Environmental Research, 2000, 5(3): 259–266. (in Chinese)
- [25] 张兴赢, 庄国顺, 袁蕙, 等. 北京沙尘暴的干盐湖盐渍土源——单颗粒物分析和 XPS 表面结构分析[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 533–537.
- ZHANG Xingying, ZHUANG Guoshun, YUAN Hui, et al. The dried salt-lakes saline soils sources of the dust storm in Beijing—the individual particles analysis and XPS surface structure analysis[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 533–537. (in Chinese)

(上接第 212 页)

- [15] 睢晋玲, 刘森, 李春林, 等. 海绵城市规划及景观生态学启示——以盘锦市辽东湾新区为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 975–982.
- SUI Jinling, LIU Miao, LI Chunlin, et al. Sponge city planning and landscape ecology enlightenment: taking Liaodong Bay New Area in Panjin City as an example [J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 975–982. (in Chinese)
- [16] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018年海南岛湿地景观格局演变及其驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 59–70.
- LEI Jinrui, CHEN Zongzhu, CHEN Yiqing, et al. Analysis on the evolution of wetland land-scape pattern and its driving forces in Hainan Island from 1990 to 2018[J]. Journal of Ecological Environment, 2020, 29(1): 59–70. (in Chinese)
- [17] HU Wenmin, GUO Li, GAO Zhihai, et al. Assessment of the impact of the Poplar Ecological Retreat Project on water conservation in the Dongting Lake wetland region using the InVEST model[J]. Elsevier B. V., 2020, 733: 139423.
- [18] 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?flag=1&file_no=20180326&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.026. (in Chinese)
- [19] 张启斌. 乌兰布和沙漠东北缘生态网络构建与优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- ZHANG Qibin. Research on the construction and optimization of ecological network in the northeastern edge of Ulan Buh Desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [20] 杨露, 颜耀文, 宗乐丽, 等. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568–579.
- YANG Lu, JIE Yaowen, ZONG Leli, et al. Optimal allocation of land use based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model in the Northwest Agro-pastoral Zone[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(3): 568–579. (in Chinese)
- [21] 裴燕如, 武英达, 于强, 等. 荒漠绿洲区潜在生态网络增边优化鲁棒性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 172–179.
- PEI Yanru, WU Yingda, YU Qiang, et al. Robust analysis of potential ecological network edge enhancement in desert oasis area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 172–179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002019&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.019. (in Chinese)