

# 甘肃省土地沙化敏感性及生态空间网络优化

仇实, 于强, 杨林哲, 马骏, 王戈, 岳德鹏

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 从宏观视角探究甘肃省沙化土地的生态修复策略, 为区域的生态空间网络构建及优化提供基础。[方法] 将土地沙化敏感性指标与生态网络相结合, 通过度中心性和介数中心性分析, 筛选敏感性较高地区的节点并对其增边优化, 最后通过增边前后鲁棒性的对比, 验证优化结果。[结果] ① 甘肃省土地沙化敏感性呈现由西北逐渐向东南依次降低的空间格局, 西北地区土地沙化情况严重。② 甘肃省东南地区生态源地与廊道密集而西北地区的源地和廊道稀少, 表明西北地区生态网络连通性差, 生态本底有待加强。③ 增边优化后的生态网络节点鲁棒性和连接鲁棒性有明显的提升, 网络边的鲁棒性略有提升但不明显。[结论] 通过增边优化策略可以提高甘肃省生态空间网络的稳定性, 并提高生态自我恢复能力, 但模拟出的生态修复路径可能由于地理条件限制, 无法进行适宜的改造或建设廊道的实际成本很大, 应结合实际情况具体考虑。

**关键词:** 甘肃省; 防风固沙; 沙化敏感性; 生态空间网络; 增边优化; 鲁棒性; 景观重构

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2022)05-0114-09

**中图分类号:** X171.4, P931.1

**文献参数:** 仇实, 于强, 杨林哲, 等. 甘肃省土地沙化敏感性及生态空间网络优化[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 114-122. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.015; Qiu Shi, Yu Qiang, Yang Linzhe, et al. Evaluation of land desertification sensitivity and ecological spatial network optimization in Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 114-122.

## Evaluation of Land Desertification Sensitivity and Ecological Spatial Network Optimization in Gansu Province

Qiu Shi, Yu Qiang, Yang Linzhe, Ma Jun, Wang Ge, Yue Depeng

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological restoration strategy of sandy land in Gansu Province from a macroscopic perspective was investigated in order to provide a foundation for the construction and optimization of a regional ecological space network. [Methods] By combining the land desertification sensitivity index with ecological networks, nodes in areas with higher sensitivity were selected and optimized by increasing the edges through degree centrality and betweenness centrality analysis. The optimization results were verified by comparing the robustness before and after enhancing the edges. [Results] ① The sensitivity of land desertification in Gansu Province showed a spatial pattern of gradually decreasing from the northwest to the southeast, and the land desertification in the northwest was serious. ② The dense ecological sources and corridors in the southeast part of Gansu Province and the scarcity of sources and corridors in the northwest part indicated that the ecological network in the northwest was poorly connected, and the ecological background needed to be strengthened. ③ The node robustness and connection robustness of the ecological network after edge-enhanced optimization was significantly improved, while the robustness of network edges was slightly but not significantly improved. [Conclusion] The stability of the ecological spatial network in Gansu Province can be improved through the edge-enhanced optimization strategy, and the ecological self-restoration capacity can be enhanced. However, the simulated ecological restoration paths may not be suitably transformed or the

收稿日期: 2022-01-20

修回日期: 2022-03-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于生态安全格局的荒漠绿洲区生态保护红线划定方法研究”(420071237)

第一作者: 仇实(1999—), 男(汉族), 北京市人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术在生态环境中的应用。Email: 240285033@qq.com。

通信作者: 岳德鹏(1963—), 男(汉族), 北京市人, 博士, 教授, 主要从事 3S 技术在生态环境建设中的应用、土地生态评价研究。Email: yuedepeng@126.com。

actual costs of constructing corridors may be large due to geographical constraints, and circumstances should be considered specifically in light of the actual situation.

**Keywords:** Gansu Province; wind-break and sand-fixation; land desertification sensitivity; ecological spatial networks; edge-enhanced optimization; robustness; landscape reconstruction

甘肃省是中国西部重要的生态安全屏障,同时也是防风固沙的重点区域,2021年11月27日甘肃省人民政府办公厅发布了“十四五”生态环境保护规划通知,明确表示要强化生态保护监管,提升生态系统质量和稳定性,科学地推进沙化土地的综合治理,加强沙化土地的综合治理,保护沙区原生植被,对符合条件的沙化土地进行封禁管护<sup>[1]</sup>。

目前,中国对于土地沙化的生态修复已经取得了一定的进展,主要通过3种方式:植被修复、农耕措施与土壤改良相结合、工程措施。冯学赞等<sup>[2]</sup>提出修建人工草地,植树造林,并且通过设置沙障来保障植物健康生长;刘嫔心<sup>[3]</sup>提出采用飞机播种措施种植适宜的本土灌木与草种,减缓土地的开垦,并通过作物改良土壤,起到一定防风固沙的作用;刘爱成<sup>[4]</sup>提出利用简单工艺将废塑料改性成为固沙胶结材料,然后在所种植物周围的沙表面喷洒固沙胶结材料,使得固沙胶结材料与表层沙胶结在一起,形成黏性固沙层,进而防止沙尘的进一步扩散,然而这些学者都是以较小尺度的方法对土地沙化进行防治,土地沙化的影响通常还会体现在更大的空间格局中,例如随着土地沙化的扩张和加剧,使得土地利用方式发生改变,进而使得生物生长环境发生变化,自然资源会随之转换,所提供的主要生态系统服务也会随之改变,最终使得整个省的生态系统服务能力发生改变。因此土地沙化需要以更加宏观的角度,展开规划研究,对土地沙化最为敏感区域的景观生态进行综合评估分析<sup>[5]</sup>。

沙化敏感性是评价自然生态系统防风固沙服务功能的重要组成部分,它反映了土地沙化的敏感程度。中国沙化敏感性研究最早源于欧阳志云等<sup>[6]</sup>提出的土地沙化敏感性评价方法(通用土地沙化敏感性评价方法),该方法也被应用到《生态功能区划技术暂行规程》和《生态保护红线划定指南》中的土地沙化敏感性评价<sup>[7]</sup>。基于甘肃省的沙化敏感性,分析所在区域的沙化敏感程度,为区域的生态空间网络构建及优化提供基础。

生态空间网络是生态学中重要的概念,是以提供生态服务功能的一种复合系统,也是一种从宏观角度进行景观生态学研究的重点,其具备3种基本属性:①自然属性,以森林、草原、湿地和荒漠等自然生态系

统为主,区别于农业、城镇人工生态系统;②功能属性,以提供生态产品或生态系统服务为主导功能的国土空间,在土地使用上具有生态属性;③作用属性,为城镇空间、农业空间的可持续发展提供基础保障<sup>[8-9]</sup>。针对甘肃省的沙化情况,可以对生态空间网络进行规划设计和修复,从生态敏感性和生态系统服务功能重要性出发,开展生态功能适宜性评价,重构更加完善的生态空间网络,有效地控制土地的沙化情况,而基于复杂网络的研究方法可以对生态空间网络的拓扑性质进行研究,是探究生态环境可持续性的重要方法<sup>[10-11]</sup>。因此,可以利用复杂网络的研究方法,提取甘肃省土地沙化潜在的生态空间网络<sup>[12]</sup>。本文借鉴了于强等<sup>[13]</sup>、牛腾等<sup>[14]</sup>、王戈等<sup>[15]</sup>、裴燕如等<sup>[16]</sup>的研究,基于复杂生态网络的方法对甘肃全省的土地沙化敏感性与潜在的生态网络进行构建,并基于复杂网络的拓扑特征与土地沙化敏感性的结果进行耦合,识别出需要进行生态修复的薄弱节点,对薄弱节点进行增边优化,以期从宏观角度下,为甘肃省的土地沙化生态修复的策略研究提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

甘肃省位于中国西北地区,位于北纬 $32^{\circ}11'$ — $42^{\circ}57'$ ,东经 $92^{\circ}13'$ — $108^{\circ}46'$ ,呈狭长状。全省总面积达到 $4.26\text{ km}^2$ ,省内地形复杂,山脉纵横交错,海拔相差悬殊,高山、盆地、平川、沙漠和戈壁等兼而有之,地势自西南向东北倾斜,是典型的山地型高原地貌。甘肃省深处内陆,属于温带季风气候,春季升温较快,冷暖变化大;夏季气温较高,降水较为集中;秋季降温较快;冬季寒冷干燥,海洋温湿的气流不易达到,使得全省干旱缺雨,年平均降水量为 $36.6\sim 734.9\text{ mm}$ ,大致从东南向西北递减。全年日照时间在 $1\ 975\sim 3\ 300\text{ h}$ 之间,日照充足。由于甘肃省特殊的地理和气候条件,以及不合理的开垦,放牧等人为因素干扰,使得甘肃省成为气候变化的敏感区和生态环境的脆弱区,其中甘肃省沙化土地面积达到了 $1.21\text{ km}^2$ ,占全省总土地面积的 $28.6\%$ ,土壤结构松散,含沙量大,干燥度指数在 $0.3\sim 63$ 之间,在冬春季节时,常伴随干旱、沙尘暴等自然灾害性天气,如何防治土地沙化实现生态可持续性是当前研究的重点。

1.2 数据来源与方法

由地理监测云平台(<http://www.dsac.cn/>)下载得到甘肃省边界区划、DEM、坡度数据;基于 Google Earth Engine 数据分析平台,通过将计算公式翻译为代码的方式计算出 NDVI、MNDWI、植被覆盖度;通过 GlobeLand 30(<http://globeland30.org/>)下载得到 2020 年土地利用数据;通过 WorldPop(<https://www.worldpop.org/>)下载得到人口密度数据;通过 Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org/>)下载得到水网和路网数据并基于 ArcGIS 中的核密度分析模块获得水网密度数据和路网密度数据;由国家气象科学数据(<https://data.cma.cn/>)中心下载得到甘肃省 2020 年全年风速数据;由中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)

下载得到土壤数据;使用 ArcGIS 10.4 的 cost-distance 模块进行阻力面的构建;通过 Matlab 对生态空间网络的拓扑性质进行分析<sup>[17-18]</sup>。

1.3 沙化敏感性评价

1.3.1 土地沙化敏感性评价方法 土地的沙化受到了自然条件和人为破坏的影响,炎热干燥的天气使土壤中的水分不足以满足大量植物生长,使得地表的植被覆盖率较低,导致地表有大量的裸露,而炎热干燥的气候进一步减缓了地表土壤的形成,使得土壤结构松散,更加容易受到风蚀的侵害,造成区域自然条件的恶化。参照《生态功能区划技术暂行规程》,选取干燥度指数、≥6 m/s 起沙风天数、土壤质地、植被覆盖度等评价指标,并根据各项指标确定分级赋值标准,不同评估指标所对应的敏感性等级见表 1。

表 1 土地沙化敏感性评估指标及分级

类 型	干燥度指标	≥6 m/s 起沙风天数/d	土壤质地	植被覆盖度%	分级赋值
不敏感	≤1.0	≤5	基岩	≥80	1
轻度敏感	1.0~1.5	5~10	黏质	60~80	3
中度敏感	1.5~4.0	10~20	砾质	40~60	5
高度敏感	4.0~16.0	20~30	壤质	20~40	7
极敏感	≥16.0	≥30	沙质	≤20	9

其中干燥度指数的计算采用了修正的谢良尼诺夫公式<sup>[19]</sup>,公式如下:

$$I_i=0.16\times\frac{\text{全年}\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C 的积温}}{\text{全年}\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C 期间的降水量}}\tag{1}$$

1.3.2 土地沙化敏感性综合评价 将以上甘肃省土地沙化的 4 个因素综合考虑,利用 ArcGIS 的空间分析功能,将 4 个因子的敏感性分级进行乘积运算<sup>[20]</sup>,公式如下:

$$D_i=\sqrt[4]{I_i\times W_i\times T_i\times C_i}\tag{2}$$

式中: $D_i$  为  $i$  空间单元土地沙化敏感性指数; $I_i$ ,  $W_i$ ,  $T_i$ ,  $C_i$  分别为  $i$  评价单元的干燥度指数、起沙风天数、土壤质地和植被覆盖敏感性等级值。

1.4 潜在生态空间网络的构建

1.4.1 生态源地的提取与阻力面的构建 分析土地利用类型,选取乔木林地、草地、灌木林地、湿地与水体的用地斑块,计算各斑块的面积、植被覆盖率、MNDWI 和斑块形状指数,依照评价指标,分析各斑块的重要程度并筛选出生态源地,其中 MNDWI 为改进的归一化水体指数;斑块形状指数为通过计算某一斑块的形状与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度来衡量斑块的复杂程度,当以正方形为标准几何参照物时<sup>[21]</sup>,公式如下:

$$\text{Shape}=\frac{0.25P}{\sqrt{A}}\tag{3}$$

式中:Shape 为斑块形状指数; $P$  为斑块周长; $A$  为斑块面积。

在研究区内,因其各个地点的地形、植被覆盖、水文分布、土地覆盖与密度因子等要素是不同的,所以生态能量流动的过程在不同地点的阻碍作用也是不同的,利用修正最小累积阻力模型,结合甘肃省的高程、坡度、植被指数(NDVI)、改进水体指数(MNDWI)、水网密度、路网密度、居民点密度和土地利用数据构建甘肃省的最小累积生态阻力面见图 1。修正的廊道阻力提取模型公式为<sup>[22]</sup>:

$$V_{\text{MCR}}=f_{\min}\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n(D_{ij}R_iP_j)\tag{4}$$

式中: $V_{\text{MCR}}$  为修正后生态用地最小生态累积阻力面值; $f_{\min}$  为一个土地单元的累积阻力最小值; $D_{ij}$  为从生态源地  $j$  到土地单元  $i$  的空间距离; $R_i$  为用地单元  $i$  运动过程的阻力系数; $P_j$  为生态源地  $j$  的能量因子, $P_j$  值越大表示生态源地斑块的生态能量越大,其中能量因子  $P_j$  的计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$P_j=A_jN_{jr}\tag{5}$$

式中: $A_j$  为第  $j$  块生态源地斑块的面积; $N_{jr}$  为第  $j$  块生态用地斑块的第  $r$  个归一化指数,本研究中选取了 NDVI 与 MNDWI 作为归一化指数,因此  $r$  取值 1,2。

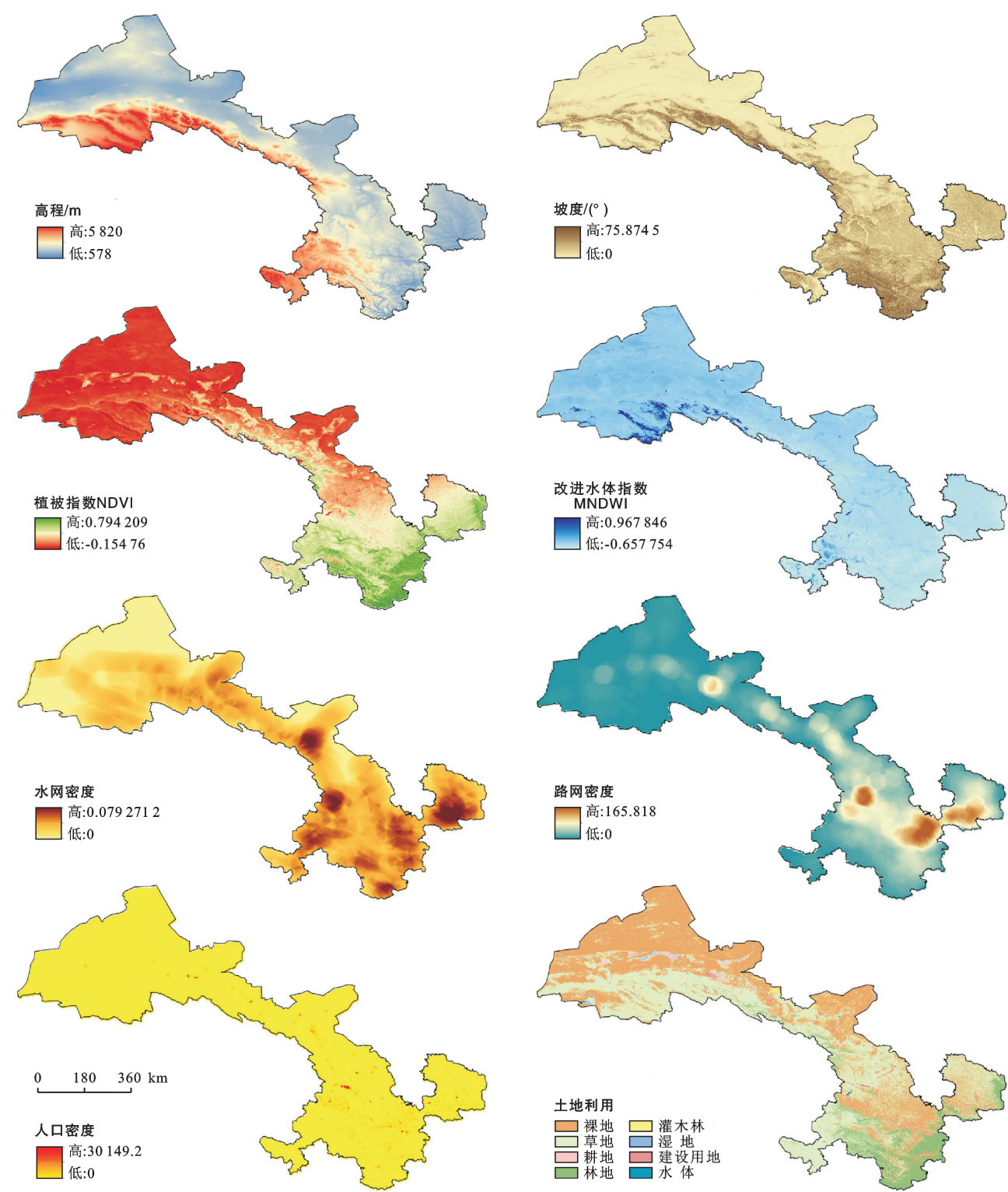


图 1 甘肃省潜在生态空间网络构建的累积阻力面阻力因子

1.4.2 生态廊道的提取与生态网络的构建 生态廊道指的是在生态环境中形状呈线性或带状的,能够通过景观生态流的运行,将空间分布上较为孤立和分散的生态单元相互连接的生态系统空间类型,景观生态流从某一生态源地出发,将会经过生态阻力最小的流动路径行进。在实际景观空间中,生态廊道可能是条

带状的林地、可能是横贯数千米的隧道,还有可能是绿地间的小路等。本文利用 ArcGIS 软件中的 cost-distance 模块,依照高程、坡度、植被指数(NDVI)、改进水体指数(MNDWI)、水网密度、路网密度、居民点密度和土地利用 8 种累计阻力面阻力因子,计算出最小生态累积阻力面值,并利用成本路径模型(cost-

path)模型根据最小生态累积阻力面值,计算出能量在不同生态源地间消耗最低的路径,进而提取生态源地间的潜在生态廊道。

潜在的生态廊道与提取后的生态源地共同构成了生态空间网络,每个源地可以提取为生态空间网络的一个节点,每条生态廊道可以提取为生态空间网络中的一条边,生态能量在不同的源地间通过廊道实现能量的流动与物质信息的交换,因此研究生态空间网络需要对复杂生态空间网络的边与节点的拓扑结构和特征进行分析,如节点度中心性、节点介数中心性、网络鲁棒性。

**1.4.3 节点度中心性** 节点的度定义为与该节点相连接的边数,节点度中心性指的是与其直接相连的邻居节点的中心程度,一个节点的节点度越大就意味着这个节点的度中心性越高,那么则认为该节点在整个网络中就越重要。节点度中心性表达式为<sup>[21]</sup>:

$$C_D(V_i) = \frac{K_i}{N-1} \quad (6)$$

式中: $C_D(V_i)$ 为节点 $V_i$ 的度中心性; $K_i$ 为节点 $V_i$ 的度; $N-1$ 为网络中最大可能的度。

**1.4.4 节点介数中心性** 介数指的是不相邻的节点 $V_j$ 与 $V_i$ 之间最短路径会途径节点 $V_i$ ,若 $V_i$ 被许多最短路径经过,则表示该节点在网络中很重要,衡量节点重要性用介数表征,其归一化指标为介数中心性,表达式为<sup>[21]</sup>:

$$C_B(V_i) = \frac{2B_i}{(2)} \quad (7)$$

式中: $C_B(V_i)$ 为节点 $V_i$ 的介数中心性; $B_i$ 为节点 $V_i$ 的介数。

**1.4.5 网络鲁棒性** 网络遭受攻击或者故障时,相当于将网络中删除若干节点或边,这将会导致原有的网络遭受破坏,如果移走某些节点后,网络仍能保持连通状态,那么则称该网络的连通性对这些节点的移除具有鲁棒性。

当网络的节点或边受到破坏后,网络对原有节点与边的恢复特性为恢复鲁棒性;网络维持各节点连通以及能量传递的能力为连接鲁棒性,其表达式为<sup>[21]</sup>:

$$R = \frac{C}{N-N_r} \quad (8)$$

式中: $R$ 为网络的连接鲁棒性; $C$ 为去除部分节点后网络的最大连通子图中节点的数量; $N$ 为网络初始节点数量; $N_r$ 为被移除的节点数目。

网络中的恢复鲁棒性分为点恢复鲁棒性和边恢

复鲁棒性,他们表征着在生态网络中生态节点和生态廊道受到攻击后的恢复能力,其公式分别为<sup>[21]</sup>:

$$D = 1 - \frac{N_r - N_d}{N} \quad (9)$$

$$E = 1 - \frac{M_r - M_e}{M} \quad (10)$$

式中: $D$ 为节点恢复鲁棒性; $E$ 为边恢复鲁棒性; $N$ 为网络中节点的个数; $N_r$ 为移除的节点个数; $N_d$ 为在移除节点后重新恢复的节点数目; $M$ 为网络中边的条数; $M_r$ 为网络中移除的边的条数; $M_e$ 为移除后恢复的边的数量。

## 2 结果与分析

### 2.1 甘肃省土地沙化敏感性评价

利用 ArcGIS 10.4 平台,依照分级赋值的指标及修正的谢良尼诺夫公式,从而得到甘肃省干燥度指数评价图;根据刘连友等<sup>[23]</sup>研究结果,沙质壤土、壤质沙土和固定风沙土的起动风速分别为 6.0, 6.6, 5.1 m/s,本研究选用冬春季节大于 6 m/s 起沙风天数指标评价土地沙化敏感性,依照分级赋值得到甘肃省大风影响评价图;不同土壤颗粒的抗剪切力不同,沙土和壤土含沙量较大,抗剪切力弱,易受到风蚀影响;而黏质土壤易形成团粒结构,抗剪切力较强,因此依照土壤类型将土质分为基岩、黏质、砾质、壤质、沙质,分级赋值得到甘肃省土壤质地评价图;植被覆盖度是衡量当地植被生长环境的一个重要指标,较高的植被覆盖率有助于防风固沙,将甘肃省植被覆盖度分级赋值得到甘肃省植被覆盖度评价图。

依照土地沙化敏感性计算公式,将上述 4 个因子的敏感性分级进行乘积运算,把甘肃省土地沙化程度分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感、极敏感 5 个等级,得到甘肃省土地沙化敏感性的综合等级分布图。上述 4 种因子评价图与土地沙化敏感性的综合等级分布如图 2 所示。

整体上看,甘肃省沙化敏感性呈现由西北逐渐向东南依次降低的空间格局。分析可知,甘肃省西北部土地沙化敏感性高,主要是因为地处西北地区,身居内陆,导致海洋中的水蒸气难以到达,使得气候更加干燥少雨,在缺乏降雨的情况下,植被生长环境较差,植被的覆盖率低,加之特殊的沙漠和戈壁等自然环境,土壤含沙量高,因此导致了甘肃省西北部土地沙化敏感性高,在构建和优化甘肃省生态网络时,应当着重加强对该地区的生态建设。

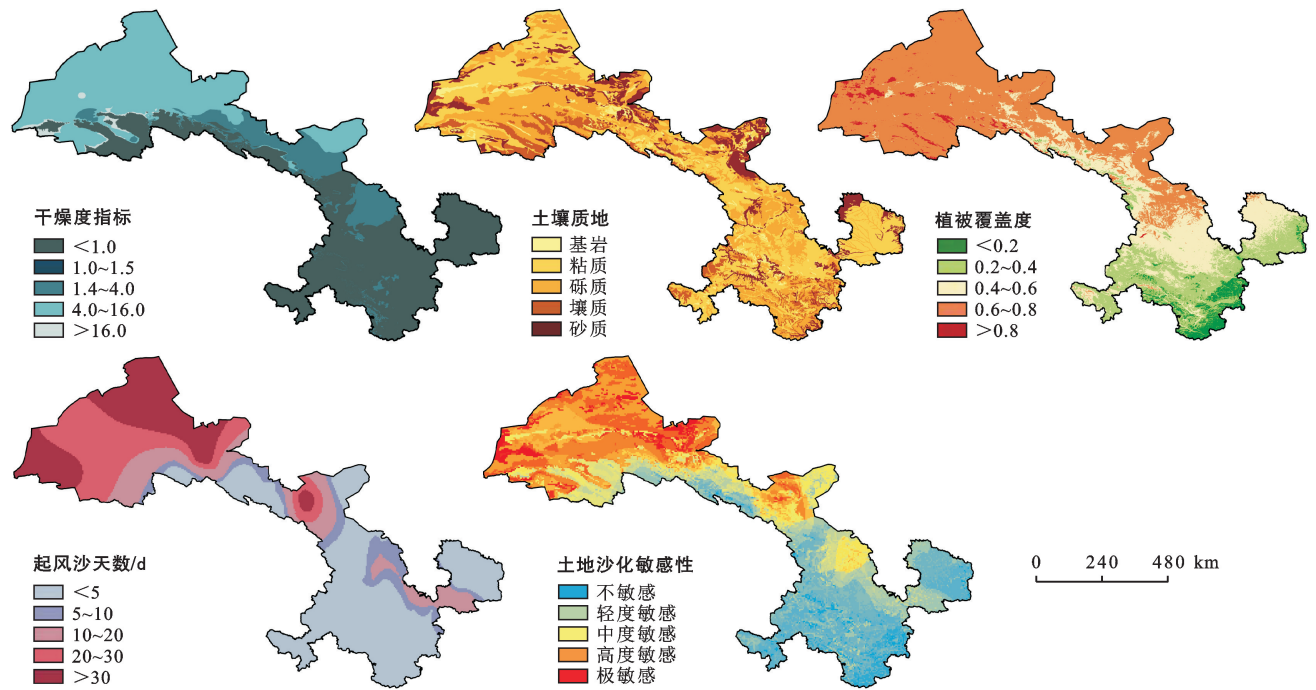


图 2 土地沙化敏感性及其因子评价

2.2 甘肃省生态网络的构建

2.2.1 生态源地筛选 研究区内乔木林地、草地、灌木林地、湿地、水体 5 种地类构成在生态地位中至关重要,因此统计 5 种地类的土地利用数据斑块,基于 NDVI,MNDWI 和斑块形状指数,筛选得到生态源地共 2 487 块,其中乔木林地 1 961 块,草地 472 块,灌木林地 33 块,湿地 1 块,水体 20 块。甘肃省生态源地分布如图 3 所示。由图 3 可知,甘肃省生态源地集中在省东南部,呈明显的片状分布,主要以大片的林地为主,源地与源地之间联系紧密;甘肃省中部有一定量的生态源地,但其数量明显少于东南部;甘肃省西北部生态源地稀少,且呈散点状分布,不同源地之间间隔较远,缺乏联系,这表明甘肃省西北部生态本底较弱。

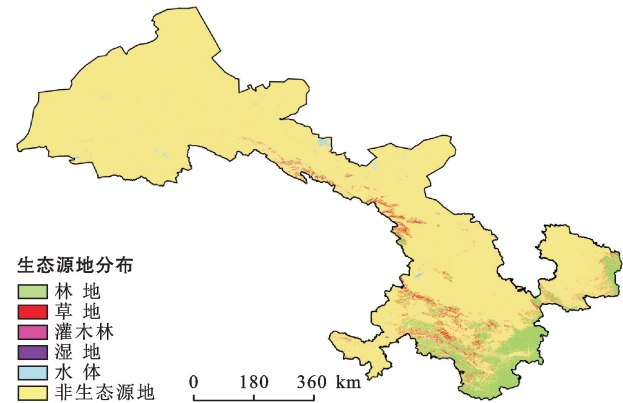


图 3 甘肃省生态源地分布

2.2.2 甘肃省生态阻力面构建 将甘肃省高程、坡度、NDVI,MNDWI、水网密度、路网密度、居民点密度、土地利用数据进行分类,依照 ArcGIS 中的自然

断点法得到 5 种分级值,并分别进行阻力值赋值,分值与赋值情况见表 2。各阻力因子对甘肃省生态格局的发展均不可或缺,因此将所有阻力因子的影响权重设为相同。将各个阻力因子放入 ArcGIS 平台,采用自然断点法进行重分类并分别赋值,将赋值后的数据通过地图代数合并,再通过 ArcGIS 软件中 cost-distance 模型得到甘肃省的累积生态阻力面。

2.2.3 甘肃省生态廊道的提取与潜在生态网络构建

通过 ArcGIS 平台的迭代器工具,将已得到的生态源地与累计生态阻力面通过使用 cost-path 模型进而生成生态廊道,将生成的生态廊道与筛选出的生态源地分别提取为生态网络的边和节点,将二者相结合共同构建出甘肃省潜在的生态网络(图 4)。提取获得的甘肃省生态节点共 2 487 个,生态廊道共 6 103 条。从已获得的生态网络情况来看,生态廊道在甘肃省东南部分布更加密集,廊道的长度更短,且生态源地数量更多;甘肃省中部生态廊道分布密度和生态源地数量和较东南部有所下降,但仍优于甘肃省西北部;甘肃省西南部生态廊道分布密度更低,且源地与源地之间的廊道较长,距离较远,这表明甘肃省西北部的生态流通性较差,该地区的生态本底有待加强。

2.3 甘肃省生态节点度中心性与介数中心性

使用 Matlab 构建出甘肃省生态网络的邻接矩阵,将邻接矩阵导入 Gephi 平台后计算出生态网络中每一个节点的度中心性及介数中心性,将数据导入 SPSS 后,节点度中心性如图 5a 所示,节点介数中心性如图 5b 所示。

表 2 甘肃省生态阻力因子分类和阻力值

影响因子	分级值	阻力值	影响因子	分级值	阻力值
高程/m	578~1 625	1	水网密度	0~0.02	9
	1 625~2 240	3		0.02~0.03	7
	2 240~2 991	5		0.03~0.05	5
	2 991~3 773	7		0.05~0.06	3
	3 773~5 821	9		0.06~0.08	1
坡度/(°)	0~4.77	1	路网密度	0~13.41	9
	4.77~12.20	3		13.41~33.20	7
	12.20~20.23	5		33.20~57.47	5
	20.23~29.46	7		57.47~93.86	3
	29.46~75.87	9		93.86~162.82	1
NDVI	-0.15~0.12	9	居民点密度	0~0.004	1
	0.12~0.25	7		0.004~0.020	3
	0.25~0.38	5		0.020~0.066	5
	0.38~0.53	3		0.066~0.149	7
	0.53~0.79	1		0.149~0.301	9
MNDWI	-0.66~-0.42	9	土地利用	林地、草地、水体	1
	-0.42~-0.31	7		灌木林	3
	-0.31~-0.06	5		耕地	5
	-0.06~0.42	3		裸地	7
	0.42~0.97	1		建筑用地	9

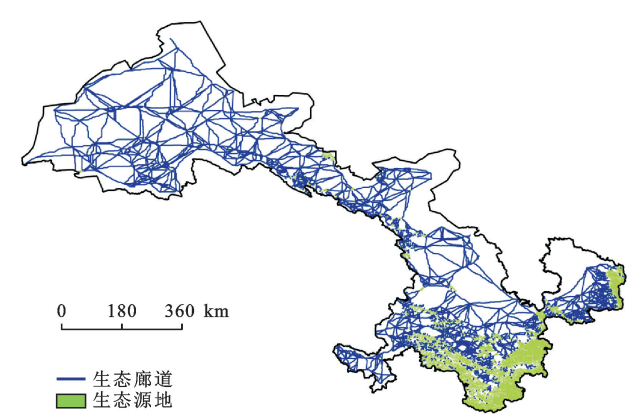


图 4 甘肃省生态源地增边前生态网络空间

由图 5a 甘肃省节点度中心性计算结果分析可知,度中心性大于 0.01 的节点共有 11 个,且大多数

分布在甘肃省东南地区,其中一个节点的度中心性达到 0.1,显著高于其他节点;度中心性小于 0.001 的生态节点共 196 个,主要分布在甘肃省西北地区,说明该地区节点的度较小,与其他周边节点的连接性较差,生态本底较差,应当对其优化,以增加生态网络整体的连通性。

由图 5b 甘肃省介数中心性计算结果分析可知,介数中心性大于 10 000 000 的节点共 7 个,位于甘肃省中部和东南地区,说明甘肃省中部和东南地区的部分节点连通性较高;介数中心性大于 5 000 000 的节点共 16 个,其中有 10 个节点位于甘肃省西北地区,说明虽然甘肃省西北地区整体的节点度中心性较差,但是仍有介数中心性较强的节点,在生态过程中发挥着不可替代的作用。

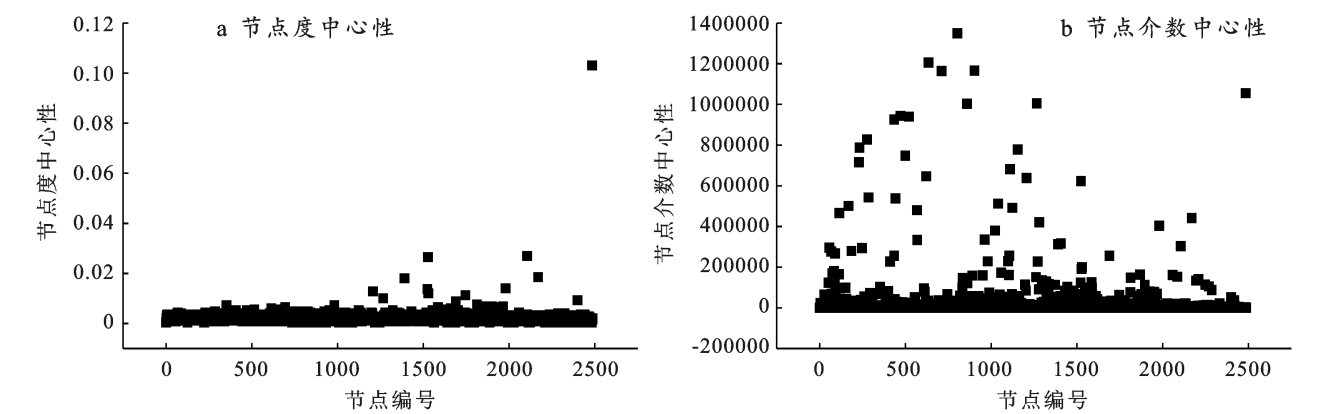


图 5 甘肃省生态节点度中心性与介数中心性

2.4 甘肃省增边节点的识别和优化

将甘肃省生态节点的度中心性、介数中心性进行综合研究与量化分析,发现二者数值较低的多个节点位于甘肃省土地沙化敏感性较差的区域,将这些节点结合土地沙化敏感性评价指标,把分布在极敏感、高度敏感、中度敏感、中度敏感的节点进行筛选,并将这些脆弱的生态节点识别为需要进行增边优化的节点。将增边节点的空间位置和拓扑结构整合考虑,通过 ArcGIS 平台的 cost-path 模型,在当前累计阻力条件下为各个节点进行模拟增边优化,使其与周边的节点形成生态廊道,所有增边节点的模拟增边优化结果如图 6 所示。

经过筛选后,成功为 164 个生态节点进行增边优化,共模拟增加生态廊道 901 条,加强了与周边节点的连通性,构建了更加完善的生态廊道。

2.5 鲁棒性分析

生态空间网络的鲁棒性表示当网络中丢失生态节点或者生态廊道时,仍能保持基本功能的能力。一般情况下我们认为鲁棒性为 1 时,网络的功能和结构

完好,当鲁棒性低于 0.1 时,我们认为网络丧失了绝大部分的功能和结构,网络处于濒临崩溃的状态。我们将甘肃省生态网络增边前后的邻接矩阵分别导入到 Matlab 中,分别对其进行随机攻击与恶意攻击,共得到 3 种形式的鲁棒性:节点与边的恢复鲁棒性,以及连接鲁棒性。在模拟攻击下甘肃省生态网络 3 种鲁棒性变化见表 3。

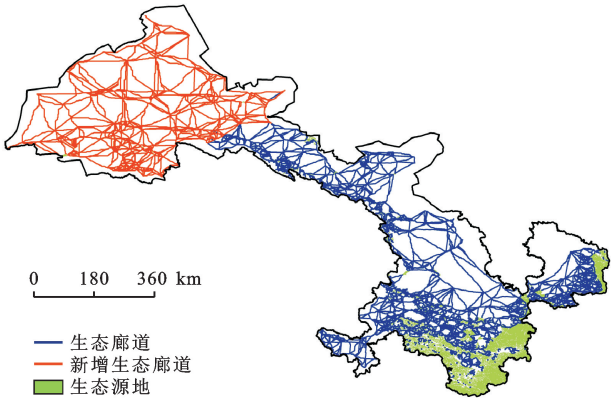


图 6 甘肃省生态源地增边后的生态空间网络

表 3 甘肃省生态空间网络优化前后鲁棒性为 1 和 0.1 的节点数量比例 %

优化情况	项 目	点恢复鲁棒性	边恢复鲁棒性	连接鲁棒性
优化前	随机攻击下鲁棒性维持 1 的节点比例	39.4	6.1	0.0
	随机攻击下鲁棒性高于 0.1 的节点比例	97.0	97.6	64.3
	恶意攻击下鲁棒性维持 1 的节点比例	36.4	0.0	0.0
	恶意攻击下鲁棒性高于 0.1 的节点比例	93.6	85.8	19.7
优化后	随机攻击下鲁棒性维持 1 的节点比例	39.7	7.8	0.0
	随机攻击下鲁棒性高于 0.1 的节点比例	98.5	99.4	80.4
	恶意攻击下鲁棒性维持 1 的节点比例	38.4	0.0	0.0
	恶意攻击下鲁棒性高于 0.1 的节点比例	96.3	86.2	25.1

由表 3 可知,优化后网络的 3 种鲁棒性在随机攻击和恶意攻击下,鲁棒性的表现均优于优化前的网络。在随机攻击下点的恢复鲁棒性中,优化后网络的鲁棒性虽然得到了提升,但是幅度较小,优化效果不明显;然而在恶意攻击下,优化效果较为明显,鲁棒性维持 1 的节点占比和鲁棒性高于 0.1 的节点比例分别提升了 2.0% 和 2.7%;在随机攻击和恶意攻击的边恢复鲁棒性中,优化效果相较于点恢复鲁棒性同样不明显,在鲁棒性维持 1 的节点比例和鲁棒性高于 0.1 的节点比例,优化提升都介于 0.0%—1.8% 之间;在连接鲁棒性中,在随机攻击和恶意攻击下鲁棒性都有较为明显的提升。其中随机攻击下鲁棒性高于 0.1 的节点提升 16.1%,恶意攻击下鲁棒性高于 0.1 的节点提升 5.4%。综合 3 种鲁棒性表现我们发现,优化后的点恢复鲁棒性和连接鲁棒性都有较为明显的提升,其中连接鲁棒性的优化提升效果最强;优化后的

边恢复鲁棒性虽有提升但不明显。因此我们认为,优化后的生态空间网络稳定性得到了提升,物质能量信息交换更加稳定,当面对外界的破坏时,其抗性和生态恢复能力得到了增强。

3 讨论

从总体来看,本研究试图通过优化甘肃省景观空间结构的策略来改善当地土地沙化情况,并提高其生态本底,而我国目前尚未有相关研究。当前一部分学者仅依照土地沙化敏感性这一评价指标,分析某一区域的土地沙化情况,然而却并未提出解决沙化土地的相关策略;另一部分学者从较小尺度的方法通过设置沙障,改良固沙胶结材料试图解决土地沙化问题,而笔者针对研究区的土地沙化敏感性,模拟重构了当地的生态空间网络,从宏观的角度分析解决土地沙化问题,笔者认为这一方法能够更好地改善大尺度下研究

区整体的土地沙化情况,并且通过研究结果表明重构后的生态空间网络具有更加稳定的拓扑性质,可以实现功能上的显著提升。在本研究中,利用最低成本路径来识别的生态廊道对应着真实的生态用地景观,包括水体、湿地、林地、草地、道路等,然而在真实的景观中,由生态源地与生态廊道所构成的生态网络,其连通性是难以进行评估和量化的,因此需要基于复杂网络理论将源地识别为网络的节点,廊道识别为网络的边,将复杂真实的景观进行简化和系统化,并通过复杂网络理论对当地潜在的生态网络进行拓扑结构的研究和优化。

在本研究中,经过增边优化后形成了新的生态空间网络,网络的结构已经发生了改变,通过结合土地沙化敏感性这一生态评价指标后,原有生态节点的度中心性、介数中心性、网络的拓扑特性也随着增边过程而发生改变,笔者认为这一过程已经实现了对原有生态空间网络的重构与优化。“十四五”生态规划以来,如何科学有效地治理沙化土地一直是一个重要的生态问题,笔者认为重构生态空间网络可以作为一种新的视角切入,对土地沙化问题和生态修复措施进行探究,在未来技术不断成熟和发展下,人们可以通过“生态空间网络重构”,来加强沙化土地的综合治理,高效合理地利用资源,实现区域景观功能的升级。

本研究同时还存在一定的局限性,通过复杂网络理论对潜在的生态网络进行增边优化,新生成的生态廊道是通过计算最低成本路径得出的,然而在真实的景观中,这些新的生态廊道可能是无法进行构建的。在原有的景观中,可能会由于特殊的地理条件和土壤条件,无法进行适当的改造和植被的种植,或者重建新的生态廊道实际的成本很大,在这些内在及外在限制条件的影响下,会导致基于复杂网络理论所生成新的生态廊道在实际应用中阻力很大。同时在土壤的风蚀过程中,有多种影响因子相互作用和制约,本文选取了干燥度、起沙风天数、土壤质地、植被覆盖度作为影响因子,但有研究表明不同的坡度对于土壤的风蚀同样具有一定的影响作用,并且针对土地利用方式的不同,以及开垦、放牧等人为影响因素下,土壤风蚀也表现出了较大的差异性<sup>[24-25]</sup>。因此,参数的选取将会对土地沙化的研究模型造成一定的影响,应当充分考虑这些因素的影响作用,进而得到更加精确的结果。

## 4 结论

(1) 甘肃省土地沙化敏感性中高敏感区域主要分布在西北地区,以酒泉市和嘉峪关市的风险最高,

东南部沙化风险较低,甘肃省沙化敏感性呈现由西北逐渐向东南依次降低的空间格局,可以基于此评价指标对中高敏感地区进行土地的治理,适地适树种植相应植被,通过植物的根系来进一步固定土地表层土壤、提高土壤抗风蚀的能力,同时种植植被还可以增加地表的粗糙度,以此来削弱风的强度和挟沙能力<sup>[26-27]</sup>。

(2) 甘肃省潜在生态网络的生态源地和生态廊道主要分布在东南地区,分布密度更高,而甘肃省中部和西北部的源地和廊道要远远少于东南部,其中以西北部源地和廊道最少,且廊道较长,分布密度低,这表明甘肃省西北部的生态流通性较差,该地区的生态本底有待加强。

(3) 通过结合复杂网络理论中度中心性、介数中心性和沙化敏感性指标,筛选需要进行提升的生态节点,并对甘肃省潜在生态网络进行增边优化,结果表明点恢复鲁棒性和连接鲁棒性有显著提升,边恢复鲁棒性有提升但不明显。表明经过增边优化后的网络,其连通性更强,通过模拟形成修复生态路径,可以有效地提升生态网络整体的稳定性和连通性,并且提高生态的自我恢复能力。

## 【参考文献】

- [1] 甘肃省人民政府办公厅.甘肃省人民政府办公厅关于印发甘肃省“十四五”生态环境保护规划的通知[Z].2021-11-27.
- [2] 冯学赞,张万军,曹建生,等.接坝地区沙地植被恢复与重建技术研究[J].水土保持研究,2004,11(3):73-75.
- [3] 刘嫔心.苏联的流沙治理[J].世界林业研究,1991,4(1):68-72.
- [4] 刘爱成.风大不见沙? 美国对付沙尘有何高招[J].中国减灾,2004(2):42-43.
- [5] 杨小鹏,王小军,陈翔舜,等.甘肃省 2009—2014 年沙化土地动态变化分析[J].中国水土保持,2018(1):50-54.
- [6] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J].生态学报,2000,20(1):9-12.
- [7] 刘军会,高吉喜,马苏,等.中国生态环境敏感区评价[J].自然资源学报,2015,30(10):1607-1616.
- [8] Fan Feifei, Wen Xiaojin, Feng Zhiming, et al. Optimizing urban ecological space based on the scenario of ecological security patterns: The case of central Wuhan, China [J]. Applied Geography, 2022,138:102619.
- [9] 张远景,俞滨洋.城市生态网络空间评价及其格局优化[J].生态学报,2016,36(21):6969-6984.
- [10] 王威,贾文涛.生态文明理念下的国土综合整治与生态保护修复[J].中国土地,2019(5):29-31.
- [11] 白中科,周伟,王金满,等.试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理[J].中国土地科学,2019,33(2):1-11.

(下转第 150 页)

- [13] 赵腾飞,郭准,郭净净,等.黄河湿地孟津段生态环境状况及对策研究[J].西北林学院学报,2019,34(1):170-174,197.
- [14] 关小克,王秀丽,任圆圆,等.黄河沿岸不同生态功能区耕地整治与优化调控研究[J].农业机械学报,2020,51(12):175-183,237.
- [15] 何文盛,岳晓.黄河流域高质量发展中的跨区域政府协同治理[J].水利发展研究,2021,21(2):15-19.
- [16] 张风霜,杨旭生,苏志国,等.河南黄河湿地自然保护区(济源段)生态旅游规划分析[J].林业调查规划,2015,40(3):60-63.
- [17] 李峥.基于 SWOT 分析的河南黄河湿地国家级自然保护区(洛阳段)生态旅游发展策略[J].安徽农学通报,2017,23(8):155-156,166.
- [18] 牛俊英,马朝红,马书钊,等.河南黄河湿地国家级自然保护区鸟类资源调查[J].四川动物,2009,28(3):462-467.
- [19] 邹大伟,李孝玲,康瑞存,等.基于 Google Earth Engine 的土地覆盖分类方法研究[J].测绘与空间地理信息,2021,44(S1):100-102,105.
- [20] 李继红,马朝红.河南孟津黄河湿地保护区保护现状及对策[J].现代农业科技,2011(21):306-307.
- [21] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):12-22.
- [22] 周婷,陈万旭,李江风,等.1995—2015 年神农架林区人类活动与生境质量的空间关系研究[J].生态学报,2021,41(15):1-12.
- [23] Tapia-Armijos M F, Homeier J, Draper Munt D. Spatio-temporal analysis of the human footprint in South Ecuador: Influence of human pressure on ecosystems and effectiveness of protected areas [J]. Applied Geography, 2017,78:22-32.
- [24] 段群滔,罗立辉.1990—2015 年青藏高原人类足迹数据集[J].中国科学数据,2020,5(3):298-307.
- [25] 陈妍,李双成.夜间灯光数据在我国自然保护区人类活动监测中应用的思考[J].环境与发展,2018,30(5):146-147,149.
- [26] 王庭辉,王喜,秦耀辰,等.丹江口库区生态系统服务价值与人类活动时空关联分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):330-341.

(上接第 122 页)

- [12] 于强,岳德鹏,张启斌,等.磴口县景观格局演变特征及生态网络构建[J].中国沙漠,2017,37(3):601-609.
- [13] 于强,刘智丽,岳德鹏,等.磴口县生态网络多情景模拟研究[J].农业机械学报,2018,49(2):182-190.
- [14] 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].农业机械学报,2019,50(8):166-175.
- [15] 王戈,于强,YANG Di,等.基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J].农业机械学报,2019,50(7):258-266.
- [16] 裴燕如,孙炎浩,于强,等.黄河流域典型矿区生态空间网络优化:以鄂榆地区为例[J].煤炭学报,2021,46(5):1541-1554.
- [17] Elnashar A, Zeng Hongwei, Wu Bingfang, et al. Assessment of environmentally sensitive areas to desertification in the Blue Nile Basin driven by the MEDALUS-GEE framework [J]. Science of the Total Environment, 2022,815:152925.
- [18] Guo Hongqiong, Yu Qiang, Pei Yanru, et al. Optimization of landscape spatial structure aiming at achieving carbon neutrality in desert and mining areas [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,322:129156.
- [19] 杨少康,刘冀,张特,等.长江上游流域地表干燥度指数时空变化特征及其对气象因子的响应研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):101-108.
- [20] 刘康,徐卫华,欧阳志云,等.基于 GIS 的甘肃省土地沙漠化敏感性评价[J].水土保持通报,2002,22(5):29-31.
- [21] 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.
- [22] Fang Minzhe, Si Guoxin, Yu Qiang, et al. Study on the relationship between topological characteristics of vegetation ecospatial network and carbon sequestration capacity in the Yellow River Basin, China [J]. Remote Sensing, 2021,13(23):4926.
- [23] 刘连友,王建华,李小雁,等.耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J].科学通报,1998,43(15):1663-1666.
- [24] 吕晓芳,王仰麟,张镱锂,等.宁夏中部生态脆弱区土地利用变化及沙漠化响应:以宁夏盐池县为例[J].地理研究,2007,26(6):1156-1164.
- [25] 王梅梅,朱志玲,吴咏梅.宁夏中部干旱带土地沙漠化评价[J].中国沙漠,2013,33(2):320-324.
- [26] 申陆,田美荣,高吉喜,等.浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力[J].应用生态学报,2016,27(1):73-82.
- [27] Wijitkosum S. Factor influencing land degradation sensitivity and desertification in a drought prone watershed in Thailand [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(2):217-228.