

乔硕,王海兵,左合君,等.毛乌素沙地绿洲化过程中生态服务价值及生态网络格局演变[J].中国沙漠,2022,42(3):118-126.

# 毛乌素沙地绿洲化过程中生态服务价值及生态网络格局演变

乔硕,王海兵,左合君,刘茜雅,吴月茹

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院/风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:** 揭示沙地生态系统服务价值及其稳定性网络格局的动态演变规律,对沙地分区治理及农、林、牧产业结构调整具有重要意义。以1986年以来土地利用变化数据为基础,统计分析毛乌素沙地生态系统服务价值(ESV)时空分异规律,以生态服务价值最大化为目标和策略,利用最小累积阻力模型(MCR),探讨了毛乌素沙地生态网络格局演变规律。结果表明:(1)1986—2020年,随着毛乌素沙地绿洲化过程的推进,林地取代沙地成为毛乌素沙地的主导地类,2020年林草覆盖率达71.38%。(2)1986—2020年,毛乌素沙地生态服务价值整体上升了198.76亿元,1986—2006、2006—2020年沙地生态服务价值增长速率分别为每年2.51亿元和10.62亿元;从空间上来看极高生态服务价值区集中分布在河南乡和毛盖图苏木,至2016年以来逐渐扩展到苏米图苏木、嘎鲁图镇等区域。(3)生态网络格局呈明显的双区分异,即生态网络稀疏的西北区,以沙地复垦地、流动沙丘和半流动沙丘为主;以及生态网络稠密的东南区,以林草覆盖率较高的固定沙地和河流、湖泊水资源丰富地区为主,且随生态服务价值高值点迁移,稳定性网络结构逐年向东北方向偏移。

**关键词:** 土地利用; 生态服务价值; 生态网络格局; 动态演变; 毛乌素沙地

**文章编号:** 1000-694X(2022)03-118-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00141

**中图分类号:** Q148

**文献标志码:** A

## 0 引言

生态安全格局是基于生态、经济、社会效益最大化,在特定的时空尺度内能够有效地组合点、线、网的配置方案,可反映空间结构功能的组织体系<sup>[1-2]</sup>。生态服务价值能体现不同自然资源禀赋特征。构建以生态服务价值提升为目标的稳定性生态安全格局,可以联通敏感的生态斑块、疏通沙地的近自然修复关系,对区域沙漠化治理与高质量发展具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

自1990年,学者研究得出众多评价生态安全网络的方法与模型,如最小累积阻力模型(MCR)、形态学空间格局分析模型(MSPA)、生态系统服务权衡综合评估模型(Invest)、电路网络模型等<sup>[5-8]</sup>。目前,主要利用MCR模型进行生态网络格局构建。早期学者以研究区水库、湖泊、河渠为源点构建生态网络,该方法仅限水源涵养价值较高的区域,并

不适用于地类丰富的区域;通过景观生态指数得出斑形状指标、聚散性指标,联结边缘规划生态安全格局,弥补了水源源点的单一性,但景观生态基于景观覆被变化,没有考虑到自然地貌等因子,只限于县、乡等小范围区域研究,难以代表整个生态安全区<sup>[8-11]</sup>;以Invest模型筛选研究区生态问题敏感区,叠加构建脆弱园区,通过结合土地利用、高程、坡度因子求最小阻力路径,拟合网络格局,该方法弥补了基础因子单一的问题,准确提取了生态服务分布情况,但阻力因子存在主观性,容易忽略同一土地利用下生态阻力差异<sup>[12-15]</sup>。生态网络结构研究愈发成熟,但不同自然环境差异悬殊,人文背景有所差异,使各地生态网络格局布设存在分歧。

长期以来,高强度的矿产开发和不合理的滥垦滥牧导致的沙漠化过程,与林业工程建设、生态修

收稿日期:2021-08-30; 改回日期:2022-01-13

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD007)

作者简介:乔硕(1996—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,主要从事荒漠化监测、景观网络格局方面的研究。

E-mail: 601077076@qq.com

通信作者:王海兵(E-mail: hbwang@imau.edu.cn)

复政策的实施形成的绿洲化过程相互博弈,使毛乌素沙地土地利用发生连续变化,且斑块状荒漠土地分布现象突显<sup>[7-8]</sup>。本文以1986年以来土地利用变化数据为基础,分析了毛乌素沙地生态系统服务价值时空分异规律,利用MCR模型,探讨毛乌素沙地生态网络格局演变规律,为巩固扩大绿洲化、优化当地生态环境提供数据和理论支撑<sup>[16-19]</sup>。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地(37°28′—39°48′N,106°57′—110°32′E)总面积4.8万km<sup>2</sup>,是中国四大沙地之一,处于

鄂尔多斯盆地和黄土高原的过渡区,是中国西北干旱区重要的地貌景观。毛乌素地势西北高、东南低,自西北向东南分布梁地、滩地平行排列的相间地貌,东南部为黄土高原的梁峁丘陵区,坡度可达25°;区域内降水自西向东递增,年降水量270—530 mm,年内盛行西南风、西北风,年平均风速2—5 m·s<sup>-1</sup>左右(图1)。四季更替明显,昼长夜短的天数较多,辐射丰富,日照充足,地下水位较浅,多年平均蒸发量1 750—1 880 mm<sup>[20-21]</sup>;研究区植被以旱生为主,主要有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)和沙柳(*Salix cheilophylla*)等。

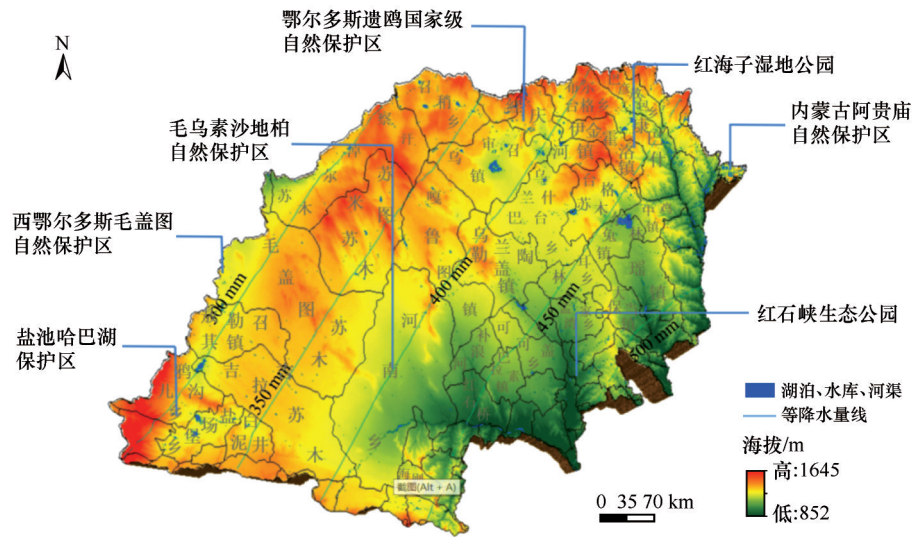


图1 毛乌素沙地重要生态源地分布  
Fig.1 Distribution map of important ecological sources in Mu Us Sandy Land

1.2 数据来源

毛乌素沙地1986、1991、1996、2001、2006、2011、2016、2020年的遥感影像来源于美国地质勘探局(USGS)的Landsat 4-5 TM、Landsat 7 ETM+和Landsat 8 OLI/TIRS影像(表1)。分辨率30 m×30 m,影像云量均≤10%。高程数据选取美国航空航天管理局(简称NASA)和日本ALOS卫星提供的分

辨率为12.5 m的DEM数据。人口、经济数据来源于内蒙古统计年鉴;气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://www.data.cma.cn/>)。

基于软件ENVI 5.3对8期的遥感影像进行几何校正、辐射定标、大气校正、镶嵌、裁剪等步骤。通过最大似然法进行监督分类,得到毛乌素沙地土地利用/覆被图,并通过野外实地调查,对解译完成的

表1 遥感影像信息表  
Table 1 Remote sensing image information

卫星	日期(月-日)	行号	列号	波段数	云量/%	分辨率
Landsat 5 TM	07-31,08-02,08-09			7	0、0.10、3.45、9.80	30 m×30 m
Landsat 7 ETM	08-28,09-13	127、128、129	032、033、034	8	0、0.05	30 m×30 m
Landsat 8 OLI/TIRS	06-03、06-12、06-20、07-05			11	0、0.05	30 m×30 m

影像进行核实、纠正, Kappa系数>0.90, 满足实验要求。根据《国家重点基础研究发展规划》提及“中国北方土地沙漠化遥感监测分类体系”和毛乌素沙地实地土勘情况, 土地类型分类为林地、草地、沙地、建设用地、水域、耕地、其他<sup>[18]</sup>。

### 1.3 研究方法

单一土地利用动态度( $K$ )和综合土地利用动态度( $LC$ )。

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

式中:  $U_a$ 、 $U_b$ 是某景观类型的初期和末期面积;  $T$ 为研究时长。

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $LU_i$ 为起始时间 $i$ 类景观类型面积;  $\Delta LU_{i-j}$ 为 $i$ 类型转为非 $i$ 类型面积变化的绝对值;  $n$ 为景观类型数量。

生态系统服务价值计算。通过提取不同年份、不同尺度单元内的各土地利用类型面积, 参考谢高地等<sup>[22]</sup>提出的中国陆地生态系统服务价值表和温璐等<sup>[23]</sup>对生态服务价值系数的调整方法, 计算出评价单元的耕地、林地、草地、水域及未利用地生态系统可提供的生态服务价值量。

$$ESV = \sum_{k=1}^n A_k \times E_A \times D_k \times R_i \quad (3)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S_{ij} + A_i) \quad (4)$$

式中:  $ESV$ 为毛乌素沙地生态系统服务价值年总量(元);  $S_{ij}$ 表示第 $i$ 种土地类型第 $j$ 种生态系统服务类型单位面积所提供的生态系统服务价值系数(元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>);  $A_i$ 表示提取出来的评价单元的第 $i$ 种土地类型的面积(hm<sup>2</sup>);  $i$ 为土地类型的数量;  $j$ 为土地生态系统的服务类型;  $m=5$ ,  $n=9$ 。

最小累积阻力模型(MCR模型)指物种从某个“源”点到目标所在地的过程中所需克服的总阻力的模型。一般情况下, 阻力系数会被定义为具体的值, 且阻力值最小处为源点, 通常定义为1, 其他影响因子的确定通常是综合考虑沙地的实际情况, 以及研究区域的建立路径目标来决定的。且单元阻力系数随目标的不一样而变化。

$$MCR = f_{\min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (D_{ij} \times R_i) \quad (5)$$

式中:  $D_{ij}$ 表示生态用地景观单元 $i$ 到 $j$ 的空间距离;  $R_i$ 是景观单元 $i$ 对某运动的阻力系数。

阻力因子选取及相关参数确定。通过搜集毛乌素沙地自然地理、人文、社会多方面的资料, 精益求精, 结合多位学者曾选取的阻力因子最终筛选出11个因子(NDVI、DEM坡度、DEM高程、农村牧区常住居民人均可支配收入、景观格局、毛乌素沙地降水量、毛乌素沙地总人口、毛乌素沙地畜牧头数、毛乌素沙地年均温度、毛乌素沙地GDP、荒漠化差值指数DDI), 通过主成分分析得到两个主成分特征值7.20和2.58, 方差百分比为65.47%和23.43%, 累积88.90%。选取权重值最大的5个指标: 景观格局、荒漠化差值指数、DEM高程、DEM坡度、植被覆盖度NDVI构建阻力评价体系(表2)。

阻力因子权重确定。参考众研究学者及沙地实地情况对高程、坡度、景观格局、荒漠化差值指数和NDVI因子统一采用评价分值的方法进行标准化处理。依据各单因子对生态保护用地扩展的影响程度分为5个阻力分值, 分级越高, 生态源地扩展难度越大。

生态源地的确立。本研究选取两类生态源地, 一类是根据研究区本有的自然保护区、湿地风景公园等, 另外一类根据毛乌素沙地34年间生态服务价值中食物生产、原材料、气体调节、气候调节、水源涵养、土壤保持、废物处理、生物多样性、景观美学的高价值、高敏感区域设为次级源地。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿洲化过程中的土地利用变化

1986—2020年毛乌素沙地林地、耕地、建设用地面积有所增加, 沙地、水域、其他用地的面积减少, 草地面积变化幅度较小, 整体呈增加的趋势。沙地面积逐年缩减由43.66%减少到21.11%; 林地占比由35.02%增加到55.13%; 水域面积变化较为缓慢, 由2.79%降低到1.94%; 耕地面积由1.85%增长到6.20%; 草地呈波动性增加的趋势, 在1986—2006年由8.82%增加到11.46%, 增加了2.64%, 然后在2006—2011年降低至10.21%, 降低了1.25%, 随后到2016年增加到11.35%, 增加了1.14%, 到2020年又减少到10.06%; 建筑用地由1.70%增加到



表 2  生态阻力赋值矩阵			
Table 2  Ecological resistance assignment matrix			
阻力因子	等级	相对阻力值	权重
景观类型	建设用地	200	0.4
	耕地、水域	50	
	草地	30	
	未利用地	10	
	园地、林地	5	
高程/m	1 950—2 160	200	0.1
	1 700—1 950	50	
	1 500—1 700	30	
	1 240—1 500	10	
	1 009—1 240	5	
坡度	>35	200	0.1
	25—35	50	
	15—25	30	
	5—15	10	
	0—5	5	
荒漠化程度	极重度	200	0.2
	重度	50	
	中度	30	
	轻度	10	
	非荒漠	5	
NDVI	0.80—1.00	200	0.2
	0.60—0.80	50	
	0.40—0.60	30	
	0.20—0.40	10	
	0—0.20	5	

4.59%;其他用地由 6.15%减少到 1.80%(表 3)。

草地面积变化较小,毛乌素沙地植被以油蒿、柠条等灌木植被为主,草地分布在建筑用地内或水域周围,分布零散。沙地最初呈带状平行排列在毛乌素中部及下端,随着时间的推移,带状沙地上逐渐出现零星的林地地类点,逐年密集呈零散分布。林地地类分布无明显规律,在毛乌素各地均有分布,逐年密集。水域受地形地貌影响,位置固定,面积变化与当年气候因子有关。耕地集中分布在乌审旗河南乡南端、鄂托克前旗吉拉苏木西端以及靖边县北端,耕地呈外散式向外扩张。建设用地的分布以各旗县的行政单位为主,集中在康巴什区、嘎鲁图镇和乌兰镇等,无明显的空间迁移变化(图 2)。

1986—2020 年毛乌素沙地土地利用动态度均为负数,表明毛乌素沙地呈不断缩减的趋势,自 2006 年,每隔 5 年毛乌素土地利用动态度愈来愈小,为-1.98%、-2.85%、-6.71%,沙地得到了明显的控制(表 4)。水域土地利用动态度均<1%,无明显剧烈变化;林地土地利用动态度均为正数,在 2006 年以后数值最高,为 3.32%、1.09%、3.23%;耕地大体呈逐年升高的趋势,在近 20 年来土地扩张迅猛,2001—2020 年间为 10.28%、-1.07%、6.83%、9.86%,在所有地类中变化最为突出。草地土地动态度呈波动性增加的趋势,变化忽增忽减;建设用地土地动态度均为正数,2000 年以来逐年剧烈增长,0.94%、1.61%、3.48%、10.72%,随着西部大开发等政策的扶持,蒙陕宁的经济得到了大力扶持,城镇化发展迅猛;其他用地整体呈减小的趋势,其土地动态度均为负数。1991 年后,区域整体综合土地利用强度逐渐加强,综合土地利用动态度指数逐年增大。

表 3  1986—2020 年毛乌素沙地不同土地利用面积(hm <sup>2</sup> )变化特征								
Table 3  Variation characteristics of different land use areas in Mu Us Sandy Land during 1986–2020								
土地利用 类型	年份							
	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2020
沙地	21 091.81	19 910.52	19 302.71	18 972.44	18 044.19	16 258.12	13 939.57	10 196.08
水域	1 347.34	1 153.83	1 117.15	1 075.92	1 103.31	955.8	920.71	890.38
林地	16 919.22	17 916.41	18 409.69	18 970.15	19 182.74	22 368.81	23 587.36	26 630.85
耕地	894.63	1 008.04	1 108.04	1 117.15	1 691.35	1 601.04	2 147.61	2 994.52
草地	4 262.88	4 932.29	5 131.86	5 373.43	5 534.24	4 934.25	5 482.68	4 857.55
建设用地	820.61	961.80	1 020.26	1 168.44	1 223.25	1 321.73	1 551.62	2 216.76
其他	2 971.24	2 424.84	2 218.02	1 630.20	1 528.65	867.98	964.28	521.59

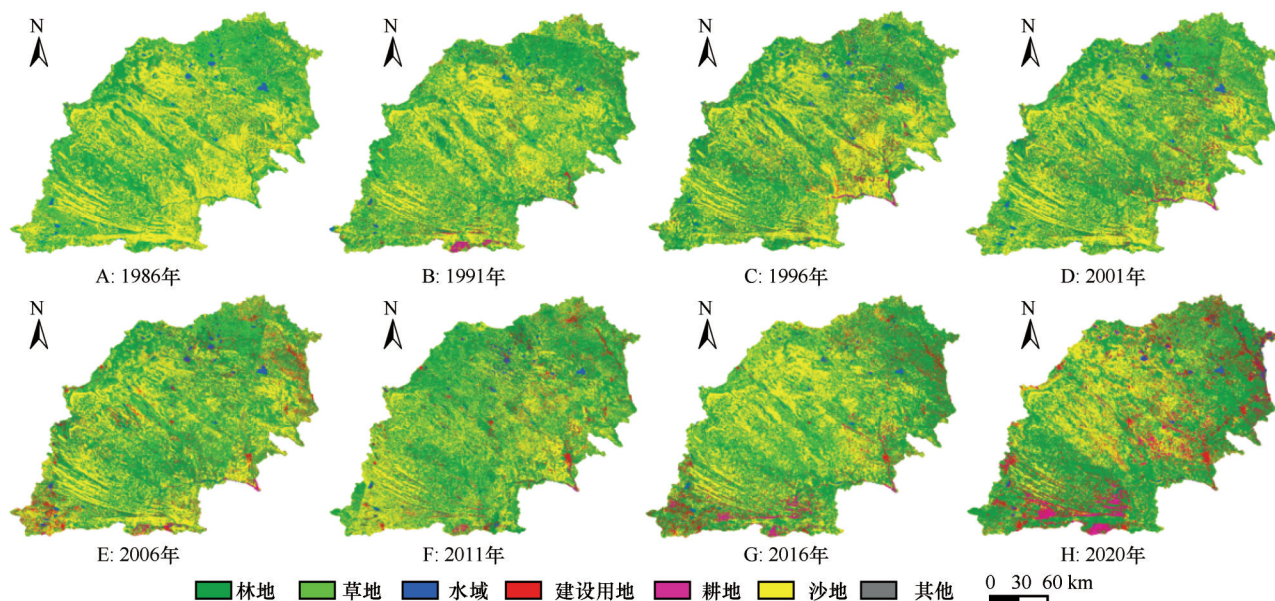


图2 不同时期土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution map of land use in different periods

表4 1986—2020年毛乌素沙地不同景观土地利用动态度及综合动态度(%)变化特征

Talbe 4 Dynamics of land use in different landscapes in the Mu Us Sandy Land from 1986 to 2020

土地利用 类型	时段						
	1986—1991年	1991—1996年	1996—2001年	2001—2006年	2006—2011年	2011—2016年	2016—2020年
沙地	-1.12	-0.61	-0.34	-0.98	-1.98	-2.85	-6.71
水域	-2.87	-0.64	-0.74	0.51	-2.67	-0.73	-0.82
林地	1.18	0.55	0.61	0.22	3.32	1.09	3.23
耕地	2.54	1.98	0.16	10.28	-1.07	6.83	9.86
草地	3.14	0.81	0.94	0.60	-2.17	2.22	-2.85
建设用地	3.44	1.22	2.90	0.94	1.61	3.48	10.72
其他	-3.68	-1.71	-5.30	-1.25	-8.64	2.22	-11.48
综合	0.80	0.35	0.40	0.42	0.70	1.59	1.93

## 2.2 绿洲化过程中生态服务价值的变动

34年间毛乌素沙地生态系统服务价值整体呈逐年增加的趋势,1986—2006年ESV呈缓慢增加的趋势,由473.17亿元增加到523.33亿元,增长速率为 $2.51 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2007—2020年呈快速增加的趋势,由523.33亿元增长至671.93亿元,增长速率为 $10.62 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$ (图3A)。从单一生态价值雷达图(图3B)可知水源涵养和废物处理价值在整个生态服务价值指标中最高,占比为16.40%和16.30%;其次是生物多样性占比14.53%,气体价值13.51%,气候调节10.89%,食物价值0.96%,原材料9.47%,土壤保持9.83%,美学景观8.12%。

近34年毛乌素沙地极高生态服务价值区集中分布在毛乌素沙地中部和北端,即河南乡、毛盖图苏木、布尔台格乡、伊金霍洛镇和康巴什区,至2016、2020年极高生态服务价值区逐渐向外扩散,并向东北方向增加(图4)。高价值服务区集中分布在罕台镇、康巴什区,在毛乌素中部零散分布,多围绕极高生态服务价值边缘分布。中生态服务价值区分布在乌审旗北端、盐池县北端、定边县北端和靖边县北端,该地沙地呈条带状分布,耕地分布较少,故经济发展较缓慢。低价值区近34年呈逐渐减少的趋势,由毛乌素中下部逐渐恢复,目前仅在鄂托克前旗巴彦敖包乡周围分布。极低价值区分布在毛乌素边缘零碎斑块。

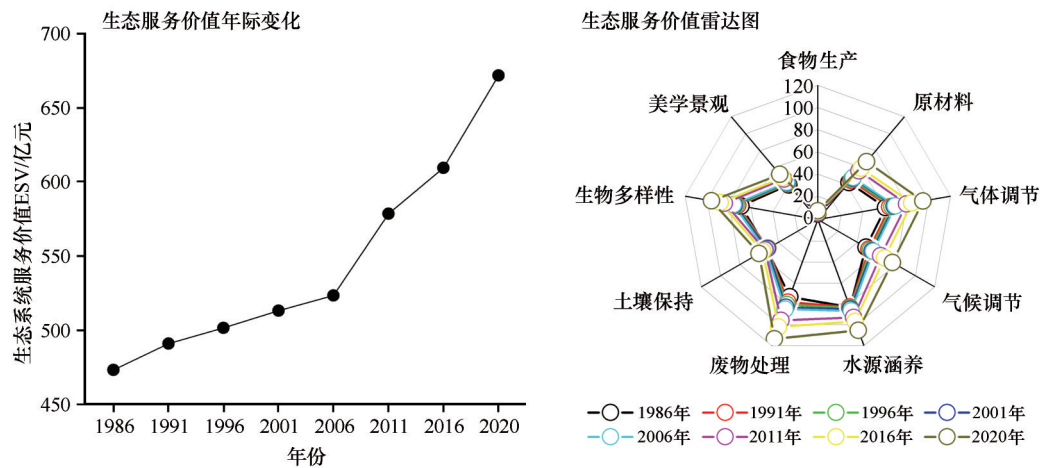


图3 毛乌素沙地生态服务价值的时间序列变化

Fig.3 Time series changes of ecological service value in Mu Us Sandy Land

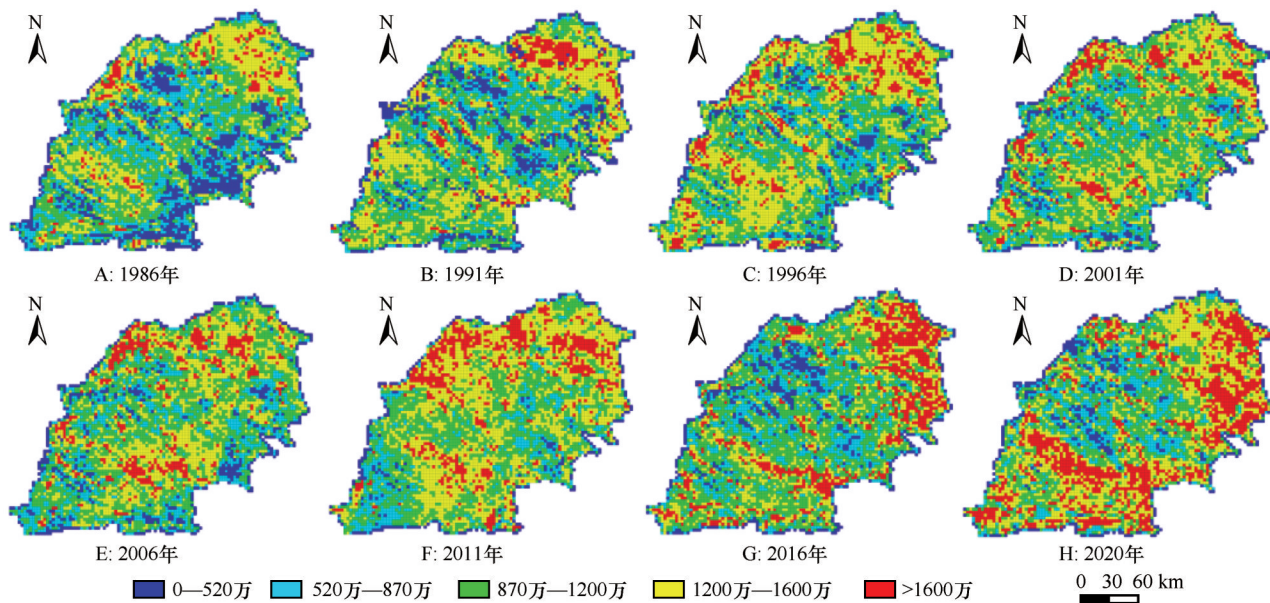


图4 毛乌素沙地生态服务价值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological service value in Mu Us Sandy Land

2.3 绿洲化生态网络格局构建

毛乌素沙地极高敏感区占比小,但呈逐渐增加的趋势,由1986年的0增加到7%,高敏感区域整体呈缓慢减小的趋势,由1986年的16%减少到1996的13%,随后到2001年增加至14%到2020年减少至11%。中敏感区域在1986—2016年集中在26%左右,2020年突然增加到36%,生态服务价值占比最大,34年间在36%—39%浮动。低敏感区域呈逐渐减小的趋势,由22%减少到8%,共减少了14%。中阻力区和高阻力区覆盖区域裸沙丘面积较大,呈带状分布,低阻力和极低阻力区覆被区域,有乌兰木伦湖和无定河两条流域分布,水源多,植被覆盖

度高(图5)。34年间,从生态源点来看,次级生态源固定点主要分布在察汗淖尔、红碱淖、无定河流域等,生态服务价值源点自南向北逐步向东北密集。生态网络格局呈明显的双区分异,即生态网络稀疏的西北区,以沙地复垦地、流动沙丘和半流动沙丘为主;以及生态网络稠密的东南区,以林草覆盖率较高的固定沙地和河流、湖泊水资源丰富地区为主,且随生态服务价值高值点迁移,稳定性网络结构逐年向东北方向偏移,与网络密度趋势相吻合。

3 讨论

毛乌素沙地近34年土地利用强度逐渐增大,主



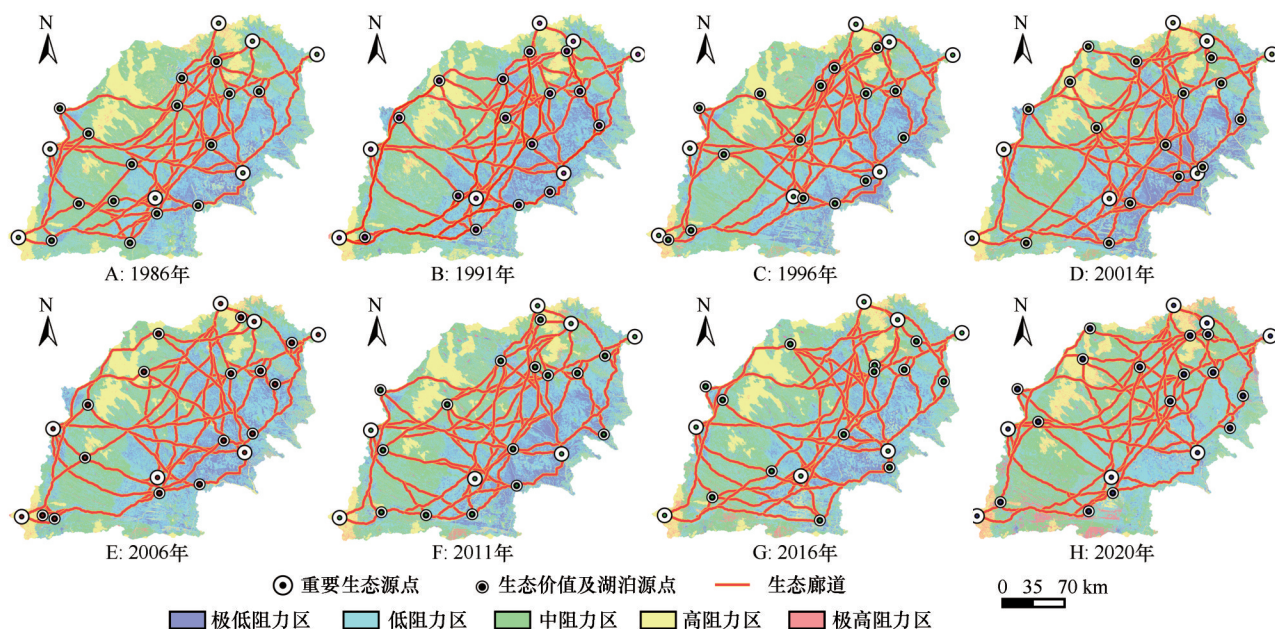


图5 毛乌素沙地生态网络格局演变

Fig.5 Spatial distribution of ecological network in Mu Us Sandy Land

要表现为沙地的减少和林地的增加,耕地面积的土地利用动态最大,建设用地、耕地呈增加的趋势,水域和其他用地呈逐渐减小。这与近40年间中国实施“三北”防护林、京津风沙源治理、退耕还林、天然林保护等沙地沙漠化防治工程,同期毛乌素沙地沙漠化得到了很好的治理密切相关<sup>[23-24]</sup>。随着区域生态环境的不断改善,人口也呈不断增加趋势,对沙地农业发展需求增大,在绿洲化过程中,耕地面积不断增大,农田防护林面积也随之增加。

国内对沙地生态系统服务价值的研究较少,仅局限在乌兰布和沙漠和阿拉善沙漠地区。不同研究者沙区ESV结论差异较大,主要原因是缺乏固定当量标准<sup>[25-27]</sup>。本文基于常用生态服务价值计算当量因子,得到毛乌素沙地生态服务价值时空动态变化特征。ESV与当地水文、植被、农牧发展、人口均有关联,各个指标的占比制约着ESV的动态变化。毛乌素沙地人口自北向南呈减小的趋势,且最南端和最西端沙地呈条带状分布,区域内盐渍湖泊众多,使得鄂托克前旗、鄂托克旗以及榆林北端地段出现地势高、人口少、可利用土地面积小的状况,最终导致毛乌素边缘ESV相对较低。毛乌素的耕地主要在乌审旗中部,耕地沿无定河流域两岸均匀分布。农业可利用水资源丰富,人口数量逐年增加,劳动力充沛,区域内旱生植物资源丰富,为畜牧业的发展提供了基础;乌审旗能源丰富,当地农牧业也得到了政府大力支持,境内经济发展迅猛,经

济反哺生态修复效果明显,成为毛乌素沙地ESV较高分布区。

生态服务价值源点空间位置随时间也有很大的变化,使得每一年的生态网络布局有很大的差异。国内外对生态安全格局演变研究均以当前年份为研究对象<sup>[27-28]</sup>。本文的生态源点散落在乌审旗区域较多,当地在生态政策方面的投入逐年加大,结合其梁地、滩地、盐碱带等独特的地形地貌,致使以生态服务价值最大化为目标和策略选定的生态源点在这个区域相对集中。鄂托克前旗、鄂托克旗人口较少、经济发展较乌审旗、伊金霍洛镇和康巴什区落后,降水量少,地势高,生态服务价值敏感区少、阻力值高、生态廊道避免网格较为稀疏。毛乌素沙地生态网络格局呈明显的双区分异,即生态网络稀疏的西北区,以沙地复垦地、流动沙丘和半流动沙丘为主;生态网络稠密的东南区,以林草覆盖率较高的固定沙地和河流、湖泊水资源丰富地区为主,且随生态服务价值高值点稳定性网络结构逐年向东北方向偏移。

鉴于毛乌素沙地生态环境脆弱的实际,在建立区域生态服务价值评价指标体系中更加侧重对山水林沙湖草等自然景观的考虑,在生态源地源点的确定过程中,加入自然保护区、生态公园等重要生态斑块对生态承载力评价结果加以修正,从而更加客观地反映生态源地的空间分布。生态网络格局及其动态演变特征的认识对沙地分区治理及农、

林、牧产业结构调整具有重要的实践指导意义。

## 4 结论

毛乌素沙地近34年绿洲化过程显著,2020年林草覆盖率达71.38%,随着绿洲化的推进,沙地生态服务价值整体上升了198.76亿元。1986—2006、2006—2020年沙地生态服务价值增长速率分别为每年2.51亿元和10.62亿元;从空间上来看极高生态服务价值区集中分布在河南乡和毛盖图苏木,2016年以来逐渐扩展到苏米图苏木、嘎鲁图镇等区域扩展。

生态网络格局呈明显的双区分异,即生态网络稀疏的西北区,以沙地复垦地、流动沙丘和半流动沙丘为主;以及生态网络稠密的东南区,以林草覆盖率较高的固定沙地和河流、湖泊水资源丰富地区为主,且随生态服务价值高值点迁移,稳定性网络结构逐年向东北方向偏移。

以生态服务价值提升为目标的生态网络格局构建,有助于开展沙地分区治理及合理调控林草沙资源结构,促进沙地生态恢复和重建。

## 参考文献:

- [1] Zhang Y Z, Jiang Z Y, Li Y Y, et al. Construction and optimization of an urban ecological security pattern based on habitat quality assessment and the Minimum Cumulative Resistance Model in Shenzhen City, China[J]. *Forests*, 2021, 12(7): 1–9.
- [2] Ma Q W, Li Y H, Xu L H. Identification of green infrastructure networks based on ecosystem services in a rapidly urbanizing area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 300: 1–11.
- [3] Miao Z H, Pan L, Wang Q Z, et al. Research on urban ecological network under the threat of road networks: a case study of Wuhan [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8: 342–357.
- [4] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 290–301.
- [5] 任涛, 贾志峰, 王智, 等. 毛乌素沙地地膜-地布覆盖下土壤水势动态[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 78–84.
- [6] 杨梅焕, 张美晨. 毛乌素沙地东南缘NDVI植被变化特征分析[J]. *地理空间信息*, 2020, 18(5): 105–108.
- [7] 楚纯洁, 赵景波, 吴楠楠, 等. 毛乌素沙地晚第四纪地层特征与沙漠化研究综述[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(5): 14–21.
- [8] 韩昭庆. 明代毛乌素沙地变迁及其与周边地区垦殖的关系[J]. *中国社会科学*, 2003(5): 191–204, 209.
- [9] 沈钦炜, 林美玲, 莫惠萍, 等. 佛山市生态网络构建及优化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3288–3298.
- [10] Liu Y W, Li J K, Xia J H, et al. Risk assessment of non-point source pollution based on landscape pattern in the Hanjiang River basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 64322–64336.
- [11] 钱佳洋, 秦富仓, 王迪海, 等. 1998–2018年永寿县景观格局变化及驱动力分析[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(6): 279–286.
- [12] Ye H, Yang Z P, Xu X L. Ecological corridors analysis based on MSPA and MCR Mode: a case study of the Tomur World Natural Heritage Region[J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 959.
- [13] 刘双嘉, 张贵军, 张蓬涛, 等. 基于生态系统服务的京津冀地区生态安全格局构建研究[J]. *林业与生态科学*, 2021, 36(2): 144–153.
- [14] 和娟, 师学义, 付扬军. 基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 814–825.
- [15] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 等. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建: 以大连市瓦房店为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 546–562.
- [16] Hu F G. Artificial intelligence system-based oasis soil water quality measurement and network marketing behavior analysis [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(15): 1–11.
- [17] 张金燕, 毋兆鹏, 于辉, 等. 干旱区精河流域绿洲化过程中土壤养分时空变异研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(2): 252–260.
- [18] 肖平. 毛乌素湖盆地浅埋地下水位下降对近地表温度及地表能量平衡的影响[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [19] 王涛, 吴薇, 薛炯, 等. 近50年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. *地理学报*, 2004, 59(2): 203–212.
- [20] 李娜, 颜长珍. 毛乌素沙地现代人为活动的生态环境效应研究进展[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 487–492.
- [21] Yin J F, Zhan X W, Zheng Y F, et al. Improving Noah land surface model performance using near real time surface albedo and green vegetation fraction[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 218: 171–183.
- [22] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003(2): 189–196.
- [23] 温璐, 宋洁, 张慧超, 等. 近30年乌兰布和沙漠生态系统服务价值评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(12): 57–64.
- [24] Li X Q, Wang M Z, Liu X J, et al. MCR-Modified CA-Markov Model for the simulation of urban expansion[J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 1–13.
- [25] 宋洁, 温璐, 王凤歌, 等. 乌兰布和沙漠生态系统服务价值时空动态[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2201–2211.
- [26] 刘淑琴, 白存琳, 边振, 等. 沙漠边缘脆弱区土地利用变化及其生态环境效应: 以毛乌素沙漠南缘盐池县为例[J]. *草业科学*, 2020, 37(11): 2175–2184.
- [27] 卢周, 扬帆, 许端阳, 等. 阿拉善干旱荒漠区土地利用变化对生态系统服务的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 296–302.
- [28] Michele De L, Giuseppina I, Claudia S, et al. A single MCR-ALS model for drug analysis in different formulations: application on diazepam commercial preparations[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2017, 134: 1–9.



## Evolution of ecological service value and network pattern of Mu Us Sandy Land

Qiao Shuo, Wang Haibing, Zuo Hejun, Liu Xiya, Wu Yueru

(College of Desert Control / Key Laboratory of Wind Blown Sand Physics and Sand Control Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** Revealing the dynamic evolution of the sandy ecosystem service value and its stability network pattern has important practical guiding significance for the regional management of degraded desert and the adjustment of the agricultural, forestry and animal husbandry industry structure. Based on the land use change data since 1986, this paper statistically analyzes the temporal and spatial differentiation of the ecosystem service value (ESV) of the Mu Us Sandy Land. It takes the maximization of ecological service value as the goal and strategy, and uses the least resistance model (MCR) to discussing the evolution law of the ecological network pattern in the Mu Us Sandy Land. The results show that: (1) In the past 34 years, with the progress of the Mu Us Sandy Land oasis process, woodland has replaced desert to become the dominant land type in the Mu Us Sandy Land, and the forest and grass coverage rate reach 71.38% in 2020. (2) From 1986 to 2020, the overall ecological service value of the Mu Us Sandy Land has increased by 19.876 billion yuan. During the process of oasis, the growth rate of desert ecological service value from 1986 to 2006 and 2006 to 2020 was 251 million yuan·yr<sup>-1</sup> and 1.062 billion yuan·yr<sup>-1</sup> respectively; from a spatial point of view, extremely high ecological service value areas were concentrated in Henan Township and Maugaitu Sumu, and has gradually expanded to Sumitusum, Gartu Town and other areas since 2016. (3) The ecological network pattern is obviously different, namely the northwest area where the ecological network is sparse, mainly sand reclamation land, mobile sand dunes and semi-mobile sand dunes; and the southeast area with dense ecological network is covered by forests and grasses. High fixed desert and areas with rich water resources in rivers and lakes are the main areas, and with the migration of high value points of ecological service value, the stability network structure shifts to the northeast direction year by year.

**Key words:** land use; ecological service value; ecological network pattern; dynamic evolution; Mu Us Sandy Land