

毛乌素沙地近 30 年沙漠化土地时空动态演变格局

韩雪莹¹, 杨光¹, 秦富仓¹, 贾光普¹, 凌侠¹, 高岗²

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.呼和浩特市林业局, 呼和浩特 010020)

摘要:应用 1990—2017 年 7 期遥感影像作为数据源,通过计算沙漠化指数和沙漠化重心迁移等指标,对毛乌素沙地近 30 年沙漠化时空动态演变格局进行了研究。结果表明:(1) 1990—2017 年沙漠化程度处于逆转趋势,沙漠化土地面积共减少 1 684.09 km²,平均 62.37 km²/a 的沙漠化土地得到有效的治理。(2) 阶段性平均沙漠化指数 1990—2000 年(快速发展)为 2.45,2000—2010 年(快速逆转)为 2.30;2010—2017 年(稳定逆转)为 2.01,沙漠化程度明显减轻。(3) 1990—2017 年,极重度沙漠化土地重心向西迁移 3.42 km;重度沙漠化土地重心向西北方向迁移 8.80 km;中度沙漠化土地重心向西北偏移 5.42 km;轻度沙漠化土地重心向东南方向延伸 9.90 km。沙漠化土地重心由西向东依次为极重度沙漠化、重度沙漠化、中度沙漠化、轻度沙漠化,在沙漠化治理与防治过程中,应根据不同沙漠化土地类型而采取不同的治理对策,做到因地制宜,合理有效地改善沙区环境。

关键词:毛乌素沙地;沙漠化;动态变化;重心迁移

中图分类号:P941.73

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0144-07

Spatial and Temporal Dynamic Patterns of Sandy Land in Mu Us in the Last 30 Years

HAN Xueying¹, YANG Guang¹, QIN Fucang¹, JIA Guangpu¹, LING Xia¹, GAO Gang²

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 0,0018, China; 2.Hohhot Forest Bureau, Hohhot 010020, China)

Abstract: The spatial and temporal dynamic patterns of desertification in Mu Us sandy land region in the last 30 years was studied in this research. The desertification index and the migration of desertification gravity center were calculated by 7-period remote sensing images from 1990 to 2017. The results show that: (1) desertification land area has been reduced by 1 684.09 km² with an average of 62.37 km²/a from 1990 to 2017, which indicates that the development of desertification is in a reversal trend; (2) the average desertification indices are 2.45 (rapid development) between 1990 and 2000, 2.30 (rapid reversal) between 2000 and 2010, and 2.01 (stable reversal) between 2010 and 2017; (3) the gravity center of extremely-severe desertification land moved only 3.42 km westward; the gravity center of severe desertification land moved 8.80 km northwest; the gravity center of moderate desertification land moved 5.42 km northwest; the gravity center of mild desertification land moved 9.90 km southeast from 1990 to 2017; from west to east, the range of gravity center of desertification land in each grade is in turn extremely severe desertification, severe desertification, moderate desertification and mild desertification. In the process of desertification prevention and control, different countermeasures should be taken to effectively improve the environment of sandy area according to different land types.

Keywords: Mu Us sandy land; desertification; dynamic change; gravity center migration

沙漠化问题对全球经济、文化、生态都产生了十分严重的影响,甚至对人类发展造成了巨大威胁^[1-2],已成为全球环境变化的热点与前沿问题。我国是世界上受沙漠化影响最严重的国家之一^[3]。1992年联合国科教文组织专家对全球环境分析,认定毛乌素沙地为全球第九大环境敏感区之一^[4],对鄂尔多斯等周边地区生态安全产生了巨大的威胁,严重的影响了当地人民的生产生活,已成为沙漠化研究的热点地区^[5-8]。目前,国内外学者利用地形图^[9]、TM影像^[10]、中巴卫星^[11]、MODIS影像^[12]作为数据源,结合景观格局指数^[12]、沙漠化指数^[13]、转化度^[14]、土地利用动态模型^[15]及数学模拟等方法对毛乌素沙地成因^[16]、土地利用情况^[17]、景观格局变化^[18]、驱动力^[19]及对周边地区沙漠化土地分布影响^[20]方面进行研究。但前人的研究时限相对过短,影像分辨率较低且集中于对土地面积变化进行监测,针对毛乌素沙地长序列多时段沙漠化土地动态变化分析较少,尤其是关于沙漠化土地重心分布及迁移趋势方面鲜有报道。

毛乌素沙地处于干旱、半干旱过渡区,为典型的农牧交错带^[6],此地域的良好发展具有重要的生态意义,可以改善我国气候,避免北旱南涝,阻击沙化进一步扩展,防止沙漠化东下移^[21]。因此,对毛乌素进行长时间序列观测,研究沙漠化动态变化和重心分布情况对沙漠化土地利用、治理以及退化生态环境的恢复具有积极作用。选取1990—2017年共7期毛乌素沙地遥感影像(分辨率为15 m),以ENVI 5.3, ArcGIS 10.2为平台,通过人机交互解译,提取毛乌素沙地不同时期不同沙漠化土地面积与空间分布,并结合数学模型对毛乌素沙漠化时空动态变化进行分析,揭示沙漠化土地时空变化的特征与规律,为研究区沙漠化土地资源的合理利用、优化配置和可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于37.45°—39.37°N, 107.67°—110.5°E,主要分布在内蒙古鄂尔多斯市南部、陕西省榆林市北部以及宁夏回族自治区盐池县东北部(图1),占地面积约4.22万km²。平均海拔1254 m,海拔由西向东逐渐递减,西北部最高可达1595 m。位于荒漠草原—干草原—森林草原的过渡带,属于典型的半干旱大陆性气候,年均温6.54~10.28℃,呈东南高于西北。年降水量250~440 mm,由西向东南方

向递增,毛乌素沙地地表水与地下水都较为充足,沙地内大小河流共170个,其中秃尾河、窟野河、无定河等河流贯穿沙地的东南部。土壤类型以初育土,棕钙土为主。主要群落植被有油蒿(*Artemisia ordosica*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、臭柏(*Sabina vulgaris*),除此之外,在滩地和丘间低地大量分布着乌柳(*Salix chvilophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙柳(*Salix psammophila*)群落,被当地人民称为柳湾林^[22]。到2015年毛乌素沙地人口问题分布不均的问题越发突出,西部地区人口密度远远少于东部地区,尤其是榆林市人口密度最大,达到378.29人/km²,已远远超出联合国半干旱区20人/km²^[23],而乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗人口密度较小,密度最小低至3.26人/km²。毛乌素沙地是重要的农牧交错区,西北主要为牧业区、东南向农业区过渡、东部向矿区过渡^[24]。

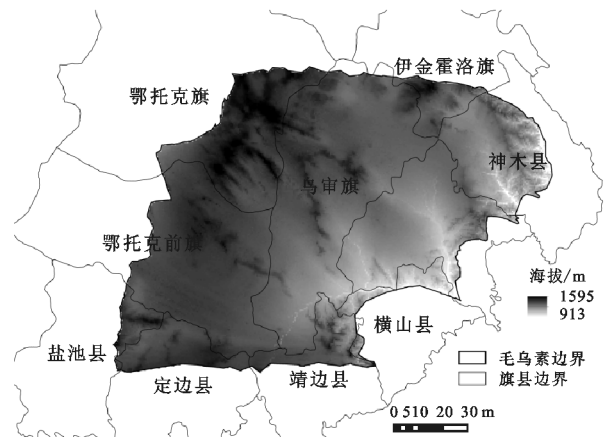


图1 研究区地理位置

2 数据与方法

2.1 影像数据来源与预处理

选取轨道号为127/33, 127/34, 128/33, 128/34的1990—2010年5期Landsat-5 TM影像以及2013年、2017年2期Landsat-8 OLI遥感影像作为基础数据,共28景(表1),7期影像获取时间均属于毛乌素沙地植被生长季(6—9月),保证了影像和地物具有可比性。为了凸显地物特征, Landsat TM影像运用Band(4)、Band(3)、Band(2)波段进行标准假彩色的合成, Landsat OLI影像运用Band(5)、Band(4)、Band(3)进行标准假彩色的合成,合成后的影像可明显区分各覆被类型,便于后续解译。对影像进行严格的几何校正和大气校正,消除了大气、光照对地物反射的影响以及由于传感器自身高度和姿态不稳定引起的非系统性几何变形,校正后的误差均小

于 0.5 个像元。通过 2010 年实地考察数据与遥感解译得到毛乌素沙地目视解译标志,在 ArcGIS 平台下对影像进行人机交互解译,影像上均匀选取 350 个点作为 2017 年野外调查点,对调查点植被盖度、沙漠化程度、流沙面积所占比例等信息进行调查,并通过混淆矩阵得出总体分类精度为 92.56%,Kappa 系数为 90.95%。

表 1 毛乌素沙地 1990—2017 年 Landsat 影像

传感器类型	轨道号	日期	127/033	127/034	128/033	128/034
Landsat-5 TM	1990 年	09-11	08-29	08-23	08-23	08-23
	1995 年	06-18	06-18	06-17	06-17	08-18
	2000 年	08-24	07-02	08-31	09-16	09-16
	2007 年	08-12	08-12	09-20	08-03	08-03
	2010 年	06-30	06-30	07-22	07-22	07-22
Landsat-8 OLI	2013 年	09-13	09-29	08-03	08-03	08-03
	2017 年	09-08	06-20	07-13	07-13	07-13

2.2 沙漠化土地分类体系

根据 2000 年的沙漠化土地监测指标和《国家重点基础研究发展规划》项目“中国北方沙漠化过程及其防治研究”所制定的“中国北方土地沙漠化遥感监测分类体系”^[25]和国家 973 项目“中国北方沙漠化过程及其防治研究”所制定的沙漠化遥感监测分类标准^[26],并参考了大量相关文献,根据程度的不同将沙漠化土地分为轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化、极重度沙漠化 4 种程度类型(表 2)。

表 2 毛乌素沙地沙漠化遥感监测分类体系

沙漠化类型	流沙面积 占该地面 积/%	植被 覆盖度/%	一定时间内流沙 面积年均扩大 占该地面积/%
轻度沙漠化	<5	>60	<1
中度沙漠化	5~25	30~60	1~2
重度沙漠化	25~50	10~30	2~5
极重度沙漠化	>50	<10	>5

2.3 沙漠化土地重心迁移模型

本文对不同沙漠化土地的重心坐标进行计算,绘制了近 30 a 毛乌素沙地沙漠化土地重心空间迁移图,将沙漠化土地重心迁移距离与方向上的变化相结合,合理的描述沙化土地时空动态变化情况。第 t 年某种类型沙漠化土地重心坐标计算公式^[27]:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times X_{ti})}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \tag{1}$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times Y_{ti})}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \tag{2}$$

式中: X_t 为第 t 年某种沙漠化土地类型的经度; Y_t 为

第 t 年某种沙漠化土地类型的纬度; n 为第 t 年该种沙漠化土地类型的斑块数; C_{ti} 为第 t 年该种沙漠化土地第 i 个斑块的面积; X_{ti} 为第 t 年该沙漠化土地类型第 i 个斑块的几何重心经度坐标; Y_{ti} 为第 t 年该沙漠化土地类型第 i 个斑块的几何重心纬度坐标。

2.4 沙漠化指数计算

为了综合的评价 1990—2017 年毛乌素沙地沙漠化程度的变化情况,引用沙漠化土地定量指标—沙漠化指数^[28-29]。

$$ADI = \frac{S_{s1} + 2S_{mo} + 3S_{se} + 4S_{ex}}{S_A} \tag{3}$$

式中:ADI 为沙漠化指数; S_{s1} 为轻度沙漠化土地面积; S_{mo} 为中度沙漠化土地面积; S_{se} 为重度沙漠化土地面积; S_{ex} 为极重度沙漠化土地面积; S_A 为沙漠化土地总面积;ADI 取值范围为 0~4,ADI 与沙漠化程度呈正相关,值越大说明研究区内沙漠化程度越严重。

3 结果与分析

3.1 沙漠化土地空间分布

结合沙漠化土地分布图(图 2)与各旗县沙漠化土地面积比例变化趋势(图 3)来综合分析近 30 a 毛乌素沙地沙漠化土地时空分布情况。

中度和重度沙漠化为 1990 年毛乌素沙地主要类型共占沙漠化土地 79.52%,其中乌审旗沙漠化最为严重,中度和重度沙漠化土地面积分别为 3 797.87 km², 3 760.29 km², 占中度、重度沙漠化土地总面积的 24.61%,29.37%。轻度沙漠化土地集中在乌审旗(38.68%)、鄂托克前旗(18.31%)、神木县(11.03%),极重度沙漠化主要聚集在毛乌素沙地西北部,以鄂托克旗(1 023.93 km²)和乌审旗(1 162.63 km²)为主,共占极重度沙漠化总面积 71.89%;1995 年极重度沙漠化土地较 1990 年增加 1 417.90 km²,主要发生在鄂托克前旗(3.83%)、定边县(0.63%)、盐池县(0.14%),重度沙漠化增加 2 245.39 km²,其中鄂托克旗增加 2.95%、神木县增加 1.65%、定边县增加 0.82%,非漠化土地减少 224.37 km²,其中神木县减少 6.39%,榆阳区减少 2.57%,1995 年沙漠化程度加重,呈发展趋势;2000 年沙漠化最严重,重度(17 417.07 km²)、极重度(4 857.98 km²)沙漠化土地面积均达到最大值,乌审旗,榆阳区重度沙漠化土地分别增加 589.09 km²,905.87 km²,中度沙漠化土地较 1995 年减少 1 320.97 km²,表现为发展趋势。

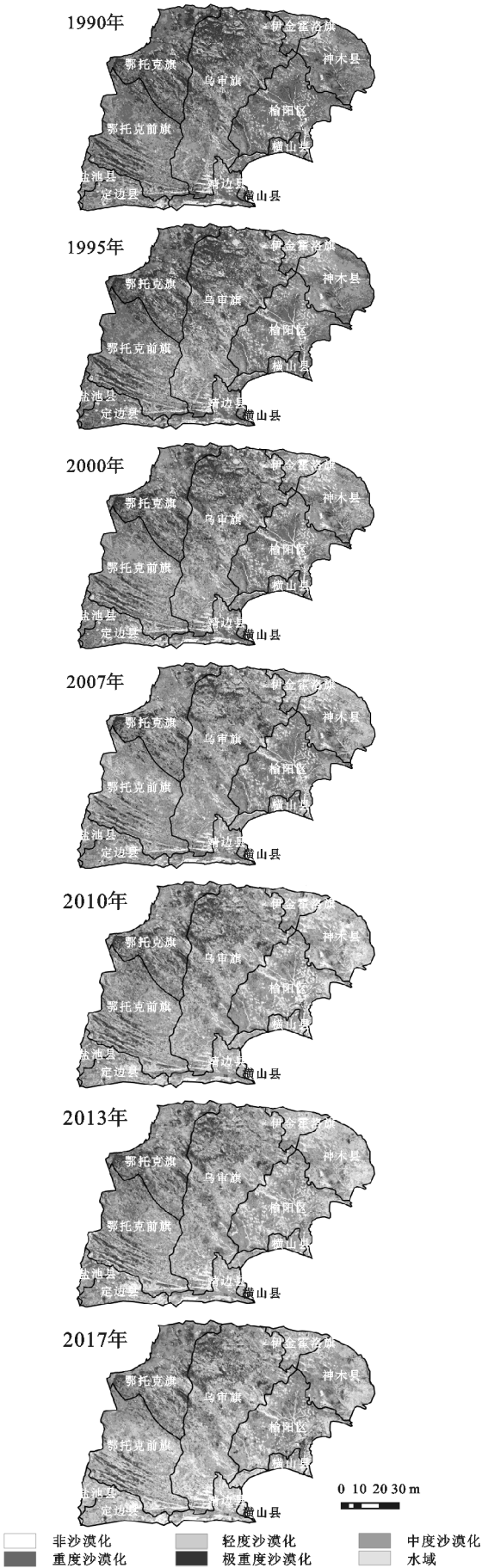


图 2 毛乌素沙地沙漠化土地分布

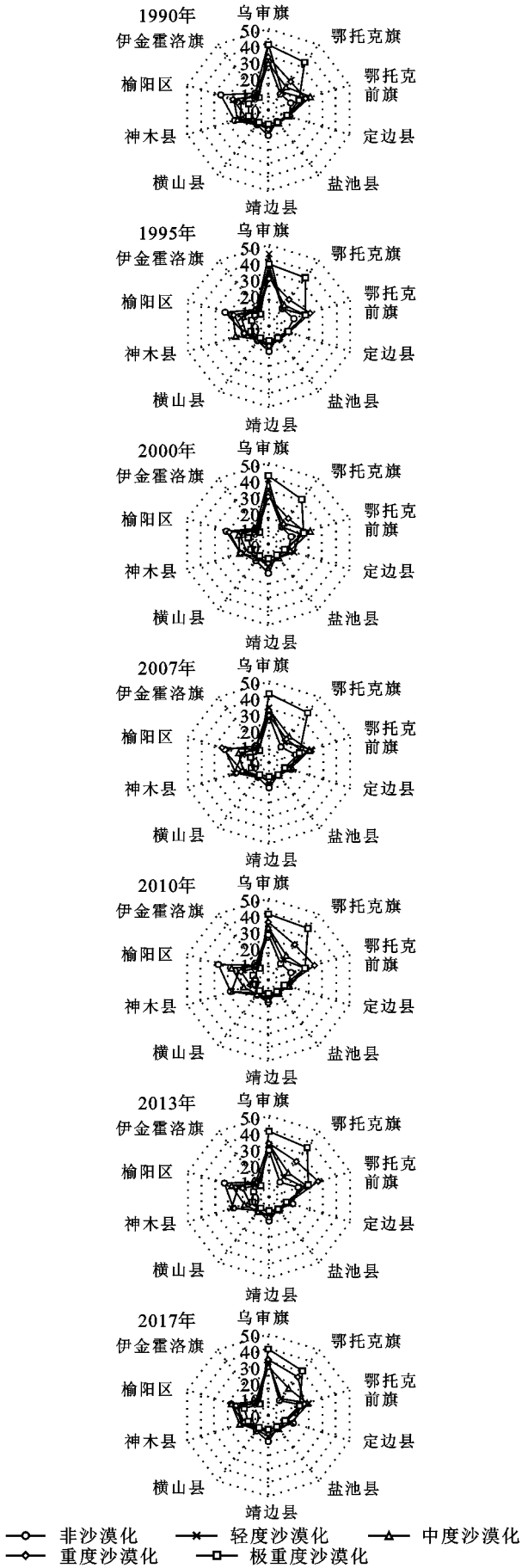


图 3 1990—2017 年各旗县沙漠化土地面积比例变化趋势

2000 年以后沙漠化程度明显减轻,2007 年沙漠化土地主要以重度(20.80%)、中度沙漠化(49.40%)为主,但重度沙漠化急剧减少,面积仅为 2000 年的 42%,极重度沙漠化程度明显降低仅占 7.15%,尤其是鄂托克前旗南部沙漠化面积减少 3.59%、榆阳区减少 0.91%、定边县减少 0.85%;轻度沙漠化有所增加主要集中在乌审旗(30.65%)、鄂托克前旗(20.81%)、神木县(15.88%);神木县、鄂托克前旗、榆阳区非沙漠化土地分别增加 3.52%、2.36%、1.36%;2010 年中度沙漠化土地面积减少 2 596.51 km²,主要分布在乌审旗(28.42%)、鄂托克前旗(17.36%)、神木县(17.32%),重度、极重度分别减少 722.23 km²,724.56 km²,主要分布在乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗。轻度沙漠化总体在乌审旗(27.64%)、鄂托克前旗(17.39%)、神木县(17.32%)有所增加,乌审旗、鄂托克前旗轻度沙漠化土地面积分别减少 3.19%和 3.45%;2013 年中度、重度、极重度沙漠化土地均有所逆转,中北部重度沙漠化土地逆转较为明显,乌审旗、榆阳区、鄂托克旗分别减少 3.16%、0.59%、0.20%,盐池县增加 0.61%,鄂托克前旗增加 1.88%,轻度沙漠化主要发生在中东部共增加 348.40 km²,其中乌审旗、榆阳区、伊金霍洛旗发展面积分别为 1.28%、1.42%、0.93%,鄂托克前旗、定边县、盐池县发生逆转,面积分别减小 2.71%、0.81%、0.26%,可见各旗县沙漠化类型表现为整体好转局部恶化;2017 年中度、重度、极重度沙漠化土地分别减少 866.41 km²,841.31 km²,85.74 km²,非沙漠化土地增加 570.84 km²,呈现整体逆转趋势,但神木县东北部地区重度沙漠化发生反弹,增加 3.72%。

1990—2000 年沙漠化程度以中度和重度为主;2000 年以后沙漠化程度明显减轻以中度、轻度沙漠化为主,呈现稳定逆转趋势,但仍有局部地区呈现发展状态。极重度沙漠化、重度沙漠化土地面积有所减小但空间分布变化不大,主要分布在乌审旗、鄂托克前旗、鄂托克旗,中度沙漠化、轻度沙漠化、非沙漠化土地主要分布在乌审旗、鄂托克前旗、榆阳区。由此可以看出乌审旗、鄂托克前旗沙漠化程度较为复杂,西部沙漠化程度较重。

3.2 沙漠化土地面积变化

通过表 3 可看出,1990—2017 年共减少沙漠化土地面积 1 684.09 km²,平均 62.37 km²/a 的沙漠化土地得到有效的治理,其中重度沙漠化所占比例由 1990 年的 35.39%降低为 17.43%,极重度沙漠化由 8.4%降低到 5.73%。近 30 a,各沙漠化土地类型之

间转化活跃,但整体处于逆转。

1990—2000 年,重度、极重度沙漠化土地不断增加,沙漠化程度不断加剧,处于发展状态。2000 年沙漠化程度最严重,重度沙漠化面积最大,达到 17 414.40 km²,极重度沙漠化土地面积达到 4 857.82 km²,2000 年以后,中度、轻度沙漠化成为沙漠化类型的主体,重度与极重度沙漠化土地得到控制,面积逐渐减小。由资料分析表明,2000 年内蒙古自治区加大防沙治沙力度先后实施了“退耕还林”工程、飞播造林、沙区封育工程、地方实行“禁牧、休木、轮牧”政策等一系列防沙治沙工程^[10],以及我国 2001 年《中华人民共和国防沙治沙法》的颁布为沙漠化防治工作提供了有力支持,使毛乌素沙地沙漠化土地沙化程度逐渐得到控制。

表 3 毛乌素沙地沙漠化土地面积变化

年份	类型	轻度 沙漠化	中度 沙漠化	重度 沙漠化	极重度 沙漠化
1990 年	面积/km ²	4910.83	15430.47	12805.26	3041.52
	比重/%	13.57	42.64	35.39	8.40
1995 年	面积/km ²	3401.23	13407.99	14996.32	4461.73
	比重/%	9.38	36.97	41.35	12.30
2000 年	面积/km ²	2709.77	11977.36	17414.40	4857.82
	比重/%	7.33	32.41	47.12	13.14
2007 年	面积/km ²	6302.08	18998.02	8725.2	2024.73
	比重/%	17.48	52.70	24.20	5.62
2010 年	面积/km ²	9505.15	16407.83	7272.15	2749.18
	比重/%	26.45	45.66	20.24	7.65
2013 年	面积/km ²	9853.49	16372.96	6941.04	1892.34
	比重/%	28.10	46.70	19.80	5.40
2017 年	面积/km ²	11084.61	15427.49	6013.86	1978.03
	比重/%	32.13	44.71	17.43	5.73

3.3 沙漠化土地动态变化

为了更直观的体现毛乌素沙地近 30 a 沙漠化土地空间动态变化及转移情况,基于 ArcGIS 10.2 空间叠加功能,对 7 期影像进行叠加分析,得到 1990—2017 年毛乌素沙地沙漠化土地动态变化表(表 4)。

根据表 4 所示,毛乌素沙地 1990—2017 年面积动态变化情况依次为:稳定>逆转>发展>明显逆转>明显发展。毛乌素沙地 45%以上的沙漠化处于稳定状态,尤其是 2010—2013 年 85.71%的沙漠化土地保持稳定;2000—2007 年逆转面积最大为 17 067.76 km²(44.19%),2007—2010 年(32.26%),2013—2017 年(24.52%)次之,1990—1995 年逆转面积最小为 1 062.51 km²(2.75%)。

1990—2000 年沙漠化土地发展程度较为严重,表现为逆转程度小于发展程度,2000 年以后发展程度有所降低,表现为逆转大于发展,但仍然处于波动状态;明显逆转与明显发展程度较小,所占比重不足 3%,沙漠化土地在 2000—2007 年明显逆转程度较大,共 784.44 km²;明显发展较为剧烈的时段主要发生在 2007—2010 年。综合分析表明,沙漠化土地逆转面积大于沙漠化土地发展面积,总体处于稳定逆转的状态。

表 4 毛乌素沙地沙漠化土地动态变化

时段	面积/比重	明显逆转	逆转	稳定	发展	明显发展
1990—1995 年	面积/km ²	119.27	1062.51	28750.68	8688.61	29.18
	比重/%	0.31	2.75	74.39	22.48	0.08
1995—2000 年	面积/km ²	150.07	4747.05	24352.83	9274.48	100.46
	比重/%	0.39	12.29	63.05	24.01	0.26
2000—2007 年	面积/km ²	784.44	17067.76	18169.93	2555.48	47.28
	比重/%	2.03	44.19	47.04	6.62	0.12
2007—2010 年	面积/km ²	328.32	12462.26	20088.07	5063.23	682.86
	比重/%	0.85	32.26	52.01	13.11	1.77
2010—2013 年	面积/km ²	505.35	2928.75	33106.54	2042.58	41.51
	比重/%	1.31	7.58	85.71	5.29	0.11
2013—2017 年	面积/km ²	283.51	9470.99	23447.11	5213.76	209.05
	比重/%	0.73	24.52	60.71	13.50	0.54

注:明显逆转表示程度减轻一级以上;逆转表示程度减轻一级;稳定表示程度没有变化;发展表示程度加重一级以上;明显发展表示程度加重一级。

3.4 沙漠化指数变化趋势

利用 1990—2017 年毛乌素沙地沙漠化土地数据计算沙漠化指数(ADI),从而得到毛乌素沙地近 30 a 沙漠化指数变化图。

根据毛乌素沙地沙漠化指数(图 4),可将近 30 a 毛乌素沙地沙漠化土地动态变化分为 3 个阶段,1990—2000 年为快速发展阶段,10 a 间 ADI 指数增长 0.27,平均 ADI 为 2.54;2000—2010 年为快速逆转阶段,10 a 间 ADI 指数减小 0.61,平均 ADI 为 2.30;2010—2017 年为稳定逆转阶段,7 a 间 ADI 指数浮动小于 0.15,平均 ADI 为 2.01。2000 年 ADI 指数达到最高为 2.66,沙漠化最为严重,2017 年沙漠化指数最小为 1.96,1990—2017 年沙漠化程度整体处于逆转趋势,沙漠化程度明显减轻。与近 30 a 沙漠化土地动态变化趋势一致。

利用回归模型对沙漠化指数进行趋势分析,得到 3 阶拟合方程: $y=0.0002x^3-1.1989x^2+2404.7x-2E+06$,相关性 $R^2=0.964\ 3$,极为显著。与近 30 a 沙漠化土地动态变化表相比,沙漠化指数 ADI 可以更

直观、准确的反映出沙漠化土地动态变化的趋势。

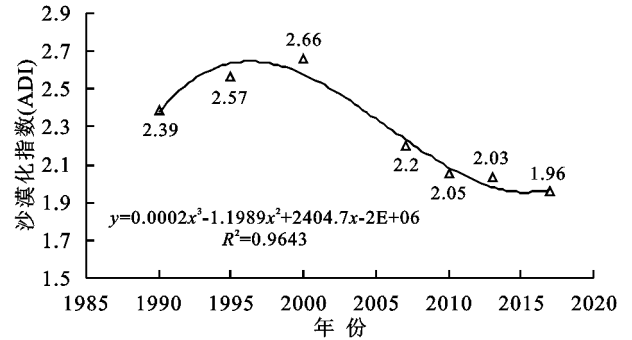


图 4 毛乌素沙地沙漠化指数

3.5 沙漠化土地重心迁移

毛乌素沙地为典型的农牧交错区,过度的开垦、放牧、采矿导致当地生态环境极为脆弱,为探究沙漠化土地在空间上的分布情况,对不同沙漠化土地的类型采取不同的治理措施,以 ArcGIS 为平台,运用重心迁移模型对不同类型的沙漠化土地重心进行计算,并绘制 1990—2017 年沙漠化土地重心空间迁移图(图 5)。

就沙漠化土地重心转移情况来看,沙漠化土地重心由西向东依次为极重度沙漠化、重度沙漠化、中度沙漠化、轻度沙漠化。极重度沙漠化土地主要集中在毛乌素沙地的西北部、严重沙漠化主要集中在中部、中度沙漠化与轻度沙漠化主要分布在东南部地区,与毛乌素沙地沙漠化土地空间分布转化趋势相一致。

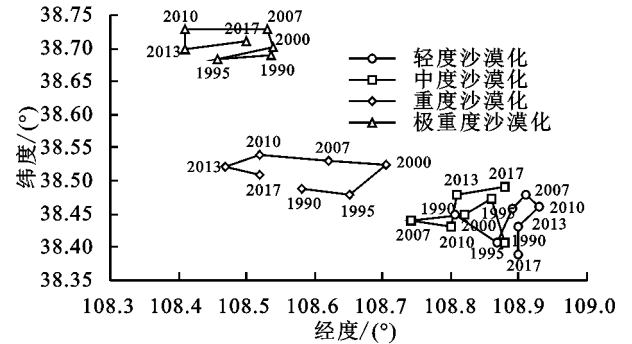


图 5 1990—2017 年毛乌素沙地沙漠化土地重心迁移

1990—2017 年,极重度沙漠化土地重心比较稳定仅向西迁移 3.42 km,1990—1995 年向西迁移 7.00 km,1995 年开始向东折回 7.35 km,2000 年开始向西北方向迁移 3.83 km,2007 年向西明显迁移 1 0.27 km,2010 年向南迁移 2.58 km 随后在 2013 年又向东迁回 8.09 km,可看出近 30 a 极重度沙漠化土地重心不稳定,有随时回迁的趋势;重度沙漠化土地重心向西北方向迁移 8.80 km,从 1990 年开始重度沙漠化不断向东扩张,10 a 间共扩张 15.19 km,到 2000 年沙漠化重心开始向西回迁,2010—2013 年开始向西南方向迁移,2013 年后沙漠化重心向西南方向迁移,迁移距离 4.46 km;中度沙漠化土地重心向西北偏移 5.42 km,

1990—2013 年中度沙漠化土地重心均向西延伸, 2013 年后向东回迁 6.50 km; 轻度沙漠化土地重心向东南方向延伸 9.90 km。1990—2007 年沙漠化土地重心向西北方向迁移, 随着防沙治沙工程不断取得效果, 2007 年后沙漠化土地重心逐渐向西南方向折回。中度沙漠化土地与轻度沙漠化土地出现相互交错的现象, 说明沙漠化土地发展得到及时的控制, 若不及时治理仍会发生反弹现象。

4 结论

(1) 1990—2017 年共减少沙漠化土地面积 1 684.09 km², 平均 62.37 km²/a 的沙漠化土地得到有效的治理, 总体处于逆转趋势, 但局部地区恶化严重。

(2) 沙漠化土地重心由西向东依次为极重度沙漠化、重度沙漠化、中度沙漠化、轻度沙漠化, 与毛乌素沙地沙漠化土地空间分布转化趋势相一致。1990—2017 年, 极重度沙漠化土地重心相对比较稳定仅向西迁移 3.42 km; 重度沙漠化土地重心向西北方向迁移 8.80 km; 中度沙漠化土地重心向西北偏移 5.42 km; 轻度沙漠化土地重心向东南方向延伸 9.90 km。可见, 重心迁移模型可以直观、准确的看出沙漠化土地在空间上的变化趋势。

(3) 利用回归模型对沙漠化指数进行趋势分析, 相关性极为显著 ($R^2=0.964\ 3$), 1990—2000 年平均 ADI 为 2.45, 2000—2010 年平均 ADI 为 2.30, 2010—2017 年平均 ADI 降低为 2.01, 1990—2017 年沙漠化程度处于整体好转, 沙漠化程度明显减轻。

(4) 毛乌素沙地北部沙漠化程度较南部严重。极重度沙漠化土地集中在毛乌素沙地西北部; 重度沙漠化土地集中在中部地区, 轻度、中度沙漠化土地主要集中在东北部。在沙漠化治理与防治过程中, 应根据不同沙漠化土地类型, 而采取不同的治理对策, 做到因地制宜, 合理有效的改善沙区环境。

参考文献:

- [1] 姚云峰, 王林和, 姚红林. 沙漠学[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1998.
- [2] 张昱晨. 土地沙漠化问题及其生态防治[J]. 环境与发展, 2018, 30(4): 46-48.
- [3] 袁刚. 基于 CA-Markov 模型的土地沙漠化预测研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [4] 郝成元. 毛乌素地区沙漠化驱动机制研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2003.
- [5] Liang P, Yang X P. Landscape spatial patterns in the

- Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors[J]. Catena, 2016, 145: 321-333.
- [6] 冯坤, 颜长珍, 谢家丽, 等. 1975—2015 年鄂尔多斯市沙漠化的时空演变过程[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 233-242.
 - [7] Lang L, Wang X, Wang G, et al. Effects of aeolian processes on nutrient loss from surface soils and their significance for sandy desertification in Mu Us Desert, China: a wind tunnel approach [J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(4): 421-428.
 - [8] 郭勇, 黄曦涛, 兰明, 等. 毛乌素沙地变化监测[J]. 测绘标准化, 2018, 34(1): 27-30.
 - [9] 吴薇, 王熙章, 姚发芬. 毛乌素沙地沙漠化的遥感监测[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 415-420.
 - [10] 闫峰, 吴波. 近 40 年毛乌素沙地沙漠化过程研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(6): 987-996.
 - [11] 王娟敏, 孙娴, 杨联安, 等. 沙化土地类型图像识别方法对比研究: 以毛乌素沙地典型地区为例[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 130-134.
 - [12] Yan F, Wu B, Wang Y J. Estimating spatiotemporal patterns of aboveground biomass using Landsat TM and MODIS images in the Mu Us Sandy Land, China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 200: 119-128.
 - [13] 温都日娜. 毛乌素沙地荒漠化景观演变特征研究[C]//中国灾害防御协会风险分析专业委员会. 风险分析和危机反应中的信息技术, 2014.
 - [14] 杨思全, 王薇. 毛乌素沙地土地沙漠化评价[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 258-262.
 - [15] 吴晓旭, 邹学勇. 基于遥感与 GIS 的乌审旗土地利用变化研究[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 199-206.
 - [16] 李晓岚. 毛乌素沙地沙漠化逆转过程及成因分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
 - [17] 全志杰, 王成吉, 毛晓利, 等. 毛乌素沙地西部区土地沙漠化动态遥感研究: 以盐池县为例[J]. 水土保持研究, 1995, 2(2): 158-162.
 - [18] 刘娟, 刘华民, 卓义, 等. 毛乌素沙地 1990—2014 年景观格局变化及驱动力[J]. 草业科学, 2017, 34(2): 255-263.
 - [19] 房世波, 许端阳, 张新时. 毛乌素沙地沙漠化过程及其气候因子驱动分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 796-801.
 - [20] 郭坚, 王涛, 韩邦帅, 等. 近 30 a 来毛乌素沙地及其周边地区沙漠化动态变化过程研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1017-1021.
 - [21] 《中国沙漠化(土地退化)防治研究》课题组. 中国沙漠化(土地退化)防治研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
 - [22] 郭紫晨, 刘树林, 康文平, 等. 2000—2015 年毛乌素沙区植被覆盖度变化趋势[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1099-1107.

(下转第 157 页)

[22] Baik H M, Lee S Y. Colloidal stability of bentonite clay considering surface charge properties as a function of pH and ionic strength[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2010,16(5):837-841.

[23] Hong J Di, Keith C C. Inhibition of nitrification to mitigate nitrate leaching and nitrous oxide emissions in grazed grassland:a review[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016,16(5):1401-1420.

[24] Bai X, Xia Z W, Guo Y L, et al. Effects of nitrification inhibitors on N₂O emission from different upland agricultural soils[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(9):2319-2329.

[25] 孙祥鑫,李东坡,武志杰,等.持续施用缓/控释尿素条件下水田土壤 NH₃ 挥发与 N₂O 排放特征[J].应用生态学报,2016,27(6):1901-1909.

[26] 俞巧钢,殷建祯,马军伟.硝化抑制剂 DMPP 应用的研究进展及影响因素[J].农业环境科学学报,2014,33(6):1057-1066.

[27] Weiske A, Benckiser G, Herbert T, et al. Influence of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate(DMPP)in comparison to dicyandiamide(DCD)on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001,34(2):109-117.

[28] Kravchenko A N, Fry J E, Guber A K. Water absorption capacity of soil-incorporated plant leaves can affect N₂O emissions and soil inorganic N concentrations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,121:113-119.

[29] Noraini M J, Peta L C, Lynette K A. Soil microbial responses to biochars varying in particle size, surface and pore properties[J]. Pedosphere, 2015,25(5):770-780.

[30] Cao T, Meng J, Liang H. Can biochar provide ammonium and nitrate to poor soils? Soil column incubation [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 17(2):253-265.

[31] Sun W J, Sun D A, Fang L, et al. Soil-water characteristics of Gaomiaozi bentonite by vapour equilibrium technique[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014,6(1):48-54.

[32] Wei Q, Xu J Z, Yang S H. Subsurface watering resulted in reduced soil N₂O and CO₂ emissions and their global warming potentials than surface watering[J]. Atmospheric Environment, 2018,173:248-255.



(上接第 150 页)

[23] 张文帅.陕甘宁黄土高原区 NDVI 变化及其在土地利用变化检测中的适宜性[D].北京:中国科学院研究生院:教育部水土保持与生态环境研究中心,2014.

[24] 赵媛媛,丁国栋,高广磊,等.毛乌素沙区沙漠化土地防治区划[J].中国沙漠,2017,37(4):635-643.

[25] 王涛,吴薇,薛娴,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.

[27] 段翰晨,王涛,薛娴,等.科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局:以内蒙古自治区奈曼旗为例[J].地理学报,2012,67(7):917-928.

[28] 万炜,颜长珍,肖生春,等.1975—2015 年阿拉善高原沙漠化过程、格局与驱动机制[J].中国沙漠,2018,38(1): 17-29.

[29] 闫峰,吴波,王艳姣.2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J].地理科学,2013,33(5):602-608.