

晋西北地区土地沙漠化时空格局及其驱动因素

薛占金^{1*}, 秦作栋², 程芳琴¹ (1. 山西大学资源与环境工程研究所, 山西 太原 030006; 2. 山西大学黄土高原研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 利用晋西北地区 1975, 1991, 2000, 2015, 2019 年遥感影像, 采用转移矩阵模型、重心迁移模型和主成分分析法, 研究晋西北地区土地沙漠化的时空变化及其驱动机制。结果表明: 土地沙漠化面积在时间上呈现先增加、后减少的动态趋势, 其中 1975~1991 年沙漠化土地面积增加 1495.10km², 非沙漠化土地转移为轻度沙漠化土地面积最大(1506.12km²); 1991~2000 年沙漠化土地面积增加 689.09km², 轻度沙漠化土地转移为中度沙漠化土地面积最大(11098.72km²); 2000~2015 年沙漠化土地面积减少 2365.85km², 中度沙漠化土地转移为轻度沙漠化土地面积最大(10569.56km²); 2015~2019 年沙漠化土地面积减少 1931.39km², 轻度沙漠化土地转移为非沙漠化土地面积最大(1909.93km²)。空间上呈现先偏南、后偏西北的迁移趋势, 其中 1975~1991 年、1991~2000 年沙漠化土地重心总体上偏南方向迁移, 重度沙漠化土地重心迁移距离最大, 分别为 19.26, 20.06km; 2000~2019 年沙漠化土地重心向西北迁移, 轻度沙漠化土地重心迁移距离最大, 为 30.29km。1975~2019 年晋西北地区土地沙漠化动态变化是自然因素和人为因素共同作用的结果, 人口数量和牲畜数量是影响沙漠化土地变化的主要人为因素, 大风日数是影响沙漠化土地变化的主要自然因素。

关键词: 土地沙漠化; 时空格局; 驱动因素; 晋西北

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)12-5428-08

Spatial-temporal patterns and driving factors of aeolian desertification in northwest Shanxi Province. XUE Zhan-jin^{1*}, QIN Zuo-dong², CHENG Fang-Qin¹ (1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China). *China Environmental Science*, 2020, 40(12): 5428~5435

Abstract: The remote sensing images (acquired in 1975, 1991, 2000, 2015, and 2019), transfer matrix, spatial center migration and principal components analysis were applied to study the spatial-temporal dynamics and driving factors (mechanisms) of aeolian desertification in northwest Shanxi. Results showed that the area of aeolian desertified land (ADL) increased first and then decreased and 1495.10km² ADL was increased during 1975 to 1991 while 1506.12km² of non-ADL was transferred into light ADL. Moreover, 689.09km² ADL was increased from 1991 to 2000 and as large as 11098.72km² of light ADL was transferred into moderate ADL. During 2000~2015, ADL had decreased by 2365.85km², and 10569.56km² of moderate ADL was transferred into light ADL. In 2015~2019, ADL had decreased by 1931.39km², and 1909.93km² of light ADL transferred into non-ADL. The trend of the ADL migration firstly migrated to southward until 2000 and moved northward/westward in 2000~2019. The migration distance of severe ADL was the largest which was 19.26km in 1975~1991 and 20.06km in 1991~2000, respectively. During 2000~2019, the largest migration distance of light ADL was 30.29km which migrated to the northwest. From 1975 to 2019, the coupling of natural and human factors was the dominant factor affecting ADL dynamics. However, the population and livestock were the main human factors and the gale days was the main natural factors.

Key words: aeolian desertification; dynamic changes; driving factor; northwest Shanxi Province

沙漠化是荒漠化的主要类型之一, 由于其分布广、危害重、影响大, 受到了学术界的广泛关注^[1-3]。中国是世界上受沙漠化影响最为严重的国家之一, 沙漠化的发生发展成为一个最严重的环境—社会—经济问题^[4-5]。20 世纪末土地沙漠化给我国造成的直接经济损失约为 1281.41 亿元/a^[6]。近年来, 土地沙漠化问题成为地理学、生态学、环境学等的研究热点, 研究成果大多集中在土地沙漠化过程及其对生态环境的影响^[7-11]。

晋西北地区位于京津地区的上风向, 特殊的地理位置和长期的人类活动造成生态环境脆弱, 土地

沙漠化问题由来已久。土地沙漠化不仅制约着本区社会经济可持续发展, 而且影响着京津地区生态安全。作为黄土高原和中国北方农牧交错带的重要组成部分, 晋西北地区于 2002 年被我国政府列入“京津风沙源治理工程”, 国家和地方政府采取多种措施, 有效遏制了土地沙漠化的蔓延。国内学者研究了晋西北地区土地沙漠化的现状、发展趋势、经济损失

投稿日期: 2020-04-21

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(201901D111002); 山西省软科学研究项目(2017041008-5); 襄垣县固废综合利用科技攻关项目(2018XYSDDS-02)

* 责任作者, 副教授, xuezhjin@sxu.edu.cn

以及气候因素^[12-15].由于数据获取、指标构建等因素,已有成果主要为单个时间节点的定性分析和静态(或截面)研究,缺乏长时间序列的时空变化分析.

本文利用遥感数据,采用转移矩阵模型和重心迁移模型分析 1975~2019 年晋西北地区土地沙漠化的时空变化,采用主成分分析法研究晋西北地区土地沙漠化的驱动机制,旨在为晋西北地区制定防沙治沙和生态恢复政策提供科学依据.

1 研究方法

1.1 研究区概况

晋西北地区西邻黄河,东接大同盆地,南靠芦芽山,北依长城,38°39′~40°17′N, 110°48′~112°52′E,包括左云县、右玉县、平鲁区、朔城区、河曲县、偏关县、保德县、神池县、五寨县等 9 个县(区)(图 1),国土总面积为 $1.42 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占山西省总面积的 9.06%.晋西北地区地形起伏和缓,苍头河、偏关河、朱家川河、桑干河和恢河等流经本区.气候处于半湿润向半干旱过渡区^[16],呈现冬季干冷、春季多风等特点,多年平均气温为 3.6~7.5℃,1 月均温 -16.0~-10.0℃,7 月均温 19.0~22.5℃;多年平均降水量为 400~500mm,主要集中在 6~9 月,占年降水量的 75%~80%;多年平均蒸发量为 1780~1950mm,约为降水量的 4 倍;受季风气候的影响,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风,多年平均风速为 2.4m/s,大风(17.2~20.7m/s)日数年平均为 20~30d,扬沙、沙尘暴过程在一定的风动力条件下也时有发生.植被处于灌丛草原向典型草原过渡区,现存植被主要为沙棘、柠条锦鸡儿、虎榛子、黄刺玫等次生灌丛及百里香等^[16].主要土壤类型为棕壤、褐土、黄绵土、冲积土、栗钙土^[17],质地松散,黏性物质缺乏,极易受到风力侵蚀.因此,冬春季节风蚀、植被稀少与沙物质丰富的耦合,是晋西北地区土地沙漠化发生的自然条件.

受煤炭开采的影响,晋西北地区的社会(城镇、交通等)、经济和人口的空间分布呈现东西高、中间低的特征.雨养农业、采矿、畜牧业是当地居民的主要生产生活方式.人口密度大(97.86~112.46 人/km),特别是过去几十年农村人口的急剧增加,导致滥采、滥垦、滥砍、滥牧等现象较为普遍,造成植被损坏、地表裸露.长期的人类活动与脆弱的生态环境相互叠加,使土地沙漠化成为晋西北严重的环境问题.

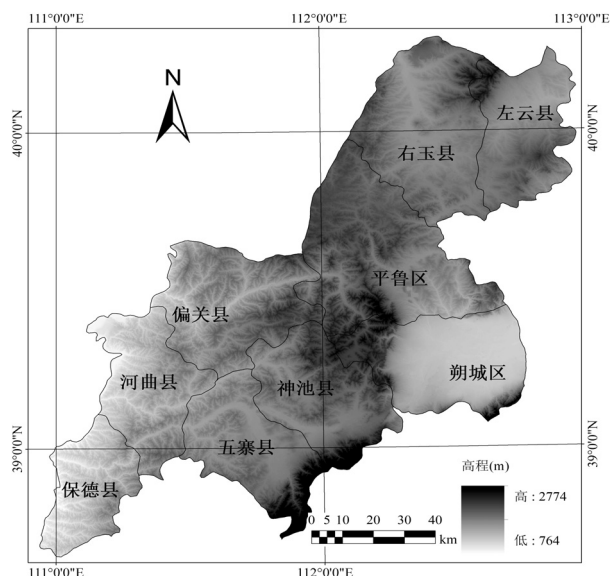


图 1 晋西北地区位置示意

Fig.1 Location of the northwest Shanxi province

1.2 数据来源与方法

1.2.1 沙漠化土地的分类 沙漠化土地的主要景观特征是植被稀疏、地表粗化、沙土裸露.在参考已有成果^[18-22]的基础上,结合晋西北地区的实际情况,本研究选用流沙面积(遥感影像上表现为线状纹理、稀疏斑点或沙丘)、植被覆盖度(遥感影像上表现为浅红、淡红、黄白或灰白斑块)、地表特征等指标^[14]作为沙漠化土地的划分依据,将沙漠化土地划分为 4 级,即:轻度、中度、重度、极重度(表 1).

1.2.2 数据来源 本研究所需的基础数据主要为遥感数据与非遥感数据.非遥感数据包括气象数据和社会经济数据等.

考虑到遥感数据的可获取性,选取 1975 年 9 月 14 日的 MSS 影像、1991 年 7 月 5 日和 2000 年 8 月 25 日的 TM 影像、2015 年 8 月 7 日和 2019 年 7 月 21 日的 OLI 影像,为便于提取沙漠化信息,选用无云或少云($\leq 5\%$)的遥感影像,空间分辨率分别为 80m (MSS),30m (TM/OLI).借助晋西北地区植被图、1:5 万地形图、土地利用图等辅助图件,在“3S”技术支持下,利用 Erdas9.1 软件的多波段遥感数据融合方法,对各期影像进行(MSS 4-2-1 波段合成, TM 4-3-2 波段合成, OLI 5-4-3 波段合成)标准假彩色合成,二次多项式校正,最邻近法重采样,校正后影像空间分辨率为 30m,校正误差控制在 1 个像元以内^[23-24].根据地面实测资料和遥感影像特征,利用 ArcMap9.3 软件进行沙漠化信息的人机交互判读与提取,解译显

示精度控制为 1:10 万,拓扑和改错处理在 ArcInfo9.3 环境下完成^[23],形成图形数据库和属性数据库,避免不同期数据库间标准和体系不同引起的误差.为了提高解译结果的准确性,笔者分别于 2015 年 8 月 20 日~9 月 10 日和 2019 年 7 月 25 日~8 月 5 日进行了

野外实地调查,随机抽取不同等级沙漠化土地各 50 个样点(共 200 个),进行 GPS 定位、相机拍摄景观照片,对照相应地点的遥感影像,现场确定沙漠化土地的程度,与解译结果进行对比分析,5 期解译精度都在 95%以上,满足研究要求^[16,23].

表 1 沙漠化土地等级划分和指标表

Table 1 Classification and indicators of aeolian desertified land grades

等级(%)	流沙	植被覆盖率(%)	地表特征	影像特征
轻度	<5	>50	吹蚀出现在沙丘的迎风坡,斑点状流沙,植被局部退化	斑块不规则,浅红、黑红斑点,表面粗糙,有流线状纹理
中度	5~25	30~50	流沙出现在灌丛沙丘迎风坡和沙丘之间,植被覆盖明显但与沙区或风蚀区相间分布	不规则斑块状,呈淡红色,有稀疏的斑点状图案
重度	25~50	10~30	沙丘处于半流动状态,植被覆盖稀疏	不规则的棕黄或黄白,沙丘清晰,点状灌丛可见
极重度	>50	<10	沙丘处于流动状态,植被很少或无	黄白、灰白色表面,流动沙丘或沙垄可见

气象数据选取 1975~2019 年晋西北气象站点的年降水量、年均温及大风日数等,来源网址为中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>. 社会经济数据来源 1975~2019 年历年山西省统计年鉴、晋西北各县区统计年鉴,以及行业统计年鉴等.

1.3 分析方法

1.3.1 沙漠化土地转移矩阵模型 采用 ArcGIS9.3 中的转移矩阵模型分析不同等级沙漠化土地的时间动态变化.转移矩阵计算公式为^[25-26]:

$$D_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij}} \quad (1)$$

式中: i, j 为沙漠化土地的等级; D_{ij} 为不同等级沙漠化土地的转移度; S_{ij} 为不同等级沙漠化土地的转移面积, km^2 ; n 为同一等级沙漠化土地的总量.

1.3.2 沙漠化土地重心迁移模型 景观空间变化可以通过空间重心变化来描述.采用人口地理学的人口分布重心原理,分析沙漠化土地的重心迁移方向和距离,进而分析不同等级沙漠化土地的空间动态变化.第 t 年某种等级沙漠化土地重心坐标计算公式为^[3,27]:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times X_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \quad (2)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}} \quad (3)$$

式中: X_t, Y_t 分别为第 t 年某等级沙漠化类型土地重心的经纬度坐标; n 为第 t 年该等级沙漠化土地的斑块数; C_{ti} 为第 t 年该等级沙漠化土地第 i 个斑块的面积, km^2 ; X_i, Y_i 分别为第 t 年该等级沙漠化土地第 i 个

斑块的经纬度坐标.

2 结果与讨论

2.1 沙漠化土地的时间变化分析

2.1.1 沙漠化土地的面积变化 通过解译 5 期遥感影像得到晋西北地区 1975~2019 年沙漠化土地分布图(图 2),利用 ArcGIS 的分类统计工具,对晋西北地区不同时期不同等级的沙漠化土地面积进行统计(表 2).结果表明,1975,1991,2000,2015,2019 年沙漠化土地面积分别为:11866.87,13361.97,14051.06,11685.21,9753.82 km^2 ,分别占国土总面积的 83.57%,94.10%,98.95%,82.29%,68.69%.45a 来晋西北地区沙漠化土地面积呈现先增加后逆转的过程.1975~1991 年沙漠化土地面积以 93.44 km^2/a 的速率迅速扩张,除了极重度沙漠化土地,其他 3 种沙漠化土地均有所增加,轻度沙漠化土地面积增加最大(1491.59 km^2).1991~2000 年沙漠化土地面积仍以 76.57 km^2/a 的速率增加,但速率有所放缓,然而中度沙漠化土地以 1273.24 km^2/a 的速率扩展,10a 增加了 11459.15 km^2 ,同时重度、极重度沙漠化土地分别增加了 33.12, 1.65 km^2 ,但轻度沙漠化土地以 1200.54 km^2/a 的速率减少,缩减了 10804.83 km^2 ,绝大部分退化为中度、重度沙漠化土地,导致晋西北地区 2000 年沙漠化土地面积达到最大,成为土地沙漠化最严重时期.2000~2015 年沙漠化土地以 157.72 km^2/a 的速率逆转,减少到 11685.21 km^2 ,在此期间,中度、重度、极重度沙漠化土地分别减少了 11327.73,30.47, 1.09 km^2 ,由于中度沙漠化土地实现了逆转,大部分转化为轻度,造成

轻度沙漠化土地明显增加. 2015~2019 年沙漠化土地以 $386.28\text{km}^2/\text{a}$ 的速率逆转,减少到 9753.28km^2 ,轻度、中度、重度、极重度沙漠化土地均有不同程度的减少.与 1975 年相比,晋西北地区 2019 年沙漠化土地面积减少了 2113.05km^2 ,轻度沙漠化土地减少了 2201.34km^2 ,但中度、重度、极重度分别增加了 $85.79,2.33,0.17\text{km}^2$,因此,在过去 45a 来,晋西北地区土地沙漠化整体逆转、局部恶化的现象依然存在.

2.1.2 沙漠化土地的转移动态 根据晋西北地区遥感影像的解译结果,利用 ArcGIS9.3 空间叠加分析模块对 5 期沙漠化数据进行计算,得到晋西北地区 1975~2019 年沙漠化土地转移矩阵(表 3).结果表明,1975~1991 年除极重度沙漠化土地没有变化外,其他等级的沙漠化土地均有不同程度地增加,其中轻度沙漠化土地增加最为明显,主要来源于非沙漠化土地的退化(1506.12km^2);中度、重度沙漠化土地的增加主要由轻度沙漠化土地转化而来,转化量分

别为 $2.42,0.92\text{km}^2$;沙漠化新增面积(1506.35km^2)远大于沙漠化逆转面积(11.25km^2),说明土地沙漠化的范围扩大和程度加重,整体呈恶化趋势.

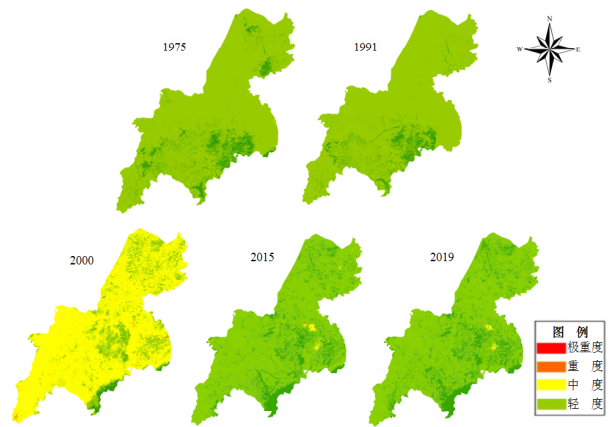


图 2 1975~2019 年晋西北地区沙漠化土地分布
Fig.2 The distribution of aeolian desertified land in northwest Shanxi in 1975~2019

表 2 晋西北地区不同时期沙漠化土地面积变化

Table 2 Areas change of aeolian desertified land of northwest Shanxi in different periods

年份	轻度		中度		重度		极重度		合计	
	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	国土面积(%)
1975	11865.64	99.97	1.03	0.02	0.20	0.01	0	0	11866.87	83.57
1991	13357.23	99.96	3.15	0.03	1.59	0.01	0	0	13361.97	94.10
2000	2552.40	18.16	11462.30	81.58	34.71	0.25	1.65	0.01	14051.06	98.95
2015	11545.84	98.80	134.57	1.16	4.24	0.03	0.56	0.01	11685.21	82.29
2019	9664.30	99.08	86.82	0.88	2.53	0.01	0.17	0.01	9753.82	68.69
1975~1991	1491.59		2.12		1.39		0		1495.10	
1991~2000	-10804.83		11459.15		33.12		1.65		689.09	
2000~2015	8993.44		-11327.73		-30.47		-1.09		-2365.85	
2015~2019	-1881.54		-47.75		-1.71		-0.39		-1931.39	
1975~2019	-2201.34		85.79		2.33		0.17		-2113.05	

通过分析 1991~2000 年沙漠化土地转移矩阵得出,轻度沙漠化土地面积明显减少,而其他 3 类沙漠化土地明显增加.轻度沙漠化土地主要转化为中度、重度沙漠化土地,其面积分别为 $11098.72,28.77\text{km}^2$,而中度、重度沙漠化土地逆转为轻度沙漠化土地的面积较小,分别为 $0.44,0.20\text{km}^2$.此外,极重度沙漠化土地的增加主要来源于轻度、中度沙漠化土地,分别为 $1.35,0.27\text{km}^2$;非沙漠化土地转化为沙漠化土地的面积 710.26km^2 ,而沙漠化土地逆转为非沙漠化土地的面积 21.17km^2 ,后者仅为前者的 2.98%.由以上分析可知,1991~2000 年晋西北地区土地沙漠化仍处于扩张阶段.

2000~2015 年中度、重度、极重度沙漠化土地面积均有不同程度的减少,而轻度沙漠化土地明显增加,增加量主要来源于中度、重度沙漠化土地逆转,其中中度沙漠化土地逆转占绝大比重,其面积为 10569.56km^2 ;中度沙漠化土地主要来源于轻度沙漠化土地退化(30.59km^2)和重度沙漠化土地逆转(24.24km^2);重度沙漠化土地分别来源于中度沙漠化退化(0.67km^2)和极重度沙漠化土地逆转(0.45km^2);轻度、中度沙漠化土地转化为非沙漠化土地的面积($1564.02,822.23\text{km}^2$)远大于非沙漠化土地转化为轻度、中度沙漠化土地的面积($11.37,9.03\text{km}^2$).

2015~2019 年不同等级的沙漠化土地面积均缩减.轻度、中度沙漠化土地分别有 1909.93,21.46km² 逆转为非沙漠化土地;在此期间非沙漠化土地未退化为沙漠化土地.以上研究结果表明,2000~2019 年晋西北地区沙漠化土地面积明显减少,程度明显减轻,整体呈逆转趋势.

表 3 晋西北地区不同等级沙漠化土地转移矩阵(km²)
Table 3 Transfer matrix of different aeolian desertified land grades in northwest Shanxi(km²)

时段	等级	轻度	中度	重度	极重度	非沙漠化	合计
1975~1991	轻度	11851.07	2.42	0.92	0	11.23	11865.64
	中度	0.04	0.51	0.46	0	0.02	1.03
	重度	0	0.02	0.18	0	0	0.20
	极重度	0	0	0	0	0	0
	非沙漠化	1506.12	0.20	0.03	0	0	1506.35
1991~2000	合计	13357.23	3.15	1.59	0	11.25	13373.22
	轻度	2208.46	11098.72	28.77	1.35	19.93	13357.23
	中度	0.44	1.35	0.35	0.27	0.74	3.15
	重度	0.20	0.10	0.76	0.03	0.50	1.59
	极重度	0	0	0	0	0	0
2000~2015	非沙漠化	343.30	362.13	4.83	0	0	710.26
	合计	2552.40	11462.30	34.71	1.65	21.17	14072.23
	轻度	957.79	30.59	0	0	1564.02	2552.40
	中度	10569.56	69.84	0.67	0	822.23	11462.30
	重度	7.12	24.24	3.12	0.23	0	34.71
2015~2019	极重度	0	0.87	0.45	0.33	0	1.65
	非沙漠化	11.37	9.03	0	0	0	20.40
	合计	11545.84	134.57	4.24	0.56	2386.25	14071.46
	轻度	9627.35	8.56	0	0	1909.93	11545.84
	中度	36.31	76.80	0	0	21.46	134.57
	重度	0.64	1.39	2.21	0	0	4.24
	极重度	0	0.07	0.32	0.17	0	0.56
	非沙漠化	0	0	0	0	0	0
	合计	9664.30	86.82	2.53	0.17	1931.39	11685.21

2.2 沙漠化土地的空间变化

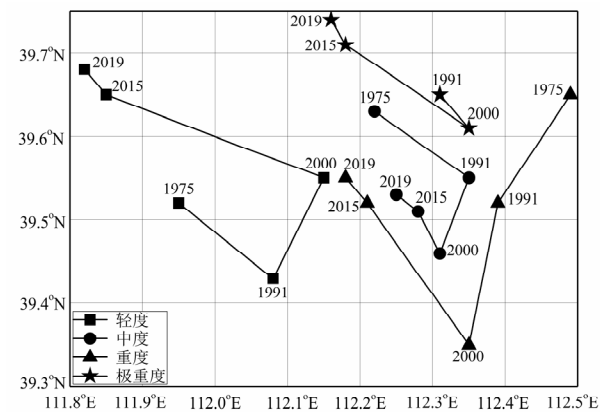


图 3 1975~2019 年晋西北地区沙漠化土地空间重心变化
Fig.3 Spatial centroid changes of aeolian desertified land in northwest Shanxi from 1975 to 2019

利用重心迁移模型计算晋西北地区不同等级

沙漠化土地的重心坐标,并绘制 1975~2019 年不同等级沙漠化土地的空间重心变化图(图 3).

从图 3 可以看出,轻度沙漠化土地主要分布在晋西北的中西部,重度沙漠化土地主要分布在中东部,极重度沙漠化土地主要分布在北部.沙漠化土地的重心分布位置与实际沙漠化土地的空间分布趋势完全一致,说明沙漠化土地重心的变化能够很好的反映沙漠化土地的空间变化^[23].1975~1991 年轻度、中度沙漠化土地重心均向东南方向迁移,迁移距离分别为 14.89,14.18km;重度沙漠化土地重心向西南迁移,迁移距离最大,为 19.26km.该时段沙漠化土地重心总体向南迁移,再次说明沙漠化面积扩张.1991~2000 年轻度沙漠化土地重心向东北迁移,迁移距离为 14.59km;中度、重度沙漠化土地重心均向西南方向迁移,迁移距离分别为 10.55,20.06km;极重度沙漠化土地重心向东南迁移,迁移距离较小,为

5.59km.虽然不同等级沙漠化土地重心迁移方向不一,但总体上偏南或偏东迁移,说明该时段沙漠化范围继续扩大.2000~2019年不同等级的沙漠化土地重心迁移方向一致,均由东南向西北迁移,其中轻度、重度沙漠化土地重心迁移距离最大,分别为 30.29、24.54km.沙漠化土地重心向西北迁移,说明沙漠化范围缩减,程度减轻.

2.3 沙漠化土地的驱动因素分析

2.3.1 自然因素对土地沙漠化的影响 自然因素主要包括:地表物质和气候条件.丰富的沙物质是沙漠化发生的先决条件.采用 100mL 环刀获取不同地貌部位 0~30cm 的土壤样品,利用激光粒度分析仪(Ankersmid BV 型,荷兰安米德有限公司)测定土壤粒度.结果表明,地表物质的机械组成主要是极细沙(0.063~0.125mm)和细沙(0.125~0.250mm),黏性物质(<0.002mm)低于 20%.土壤质地松散,内聚力差,为扬沙、浮尘天气及沙漠化发生发展提供了物质基础.

气候条件主要有气温、降水和风速.晋西北地区 1975~2019 年气温以 0.19~0.22℃/10a 的速率上升,这远高于全球的增温速率(0.03~0.06℃/10a)^[9].气温升高影响着植被的生长、分布、种类和结构等,加速了土壤表层水分的循环和蒸发,降低了土壤湿度,加强了地表风蚀.1975~2019 年降水量呈下降趋势,减少率为 9.53mm/10a^[13].降水减少与气温升高相叠加,气候的干旱趋势更为显著,限制了植被生长与恢复,加速了土地沙漠化的发展.1975~2019 年大风日数平均为 22.6~24.4d,且主要发生在冬季和春季,这也正是降水稀少、植被稀疏的季节.频繁、强劲的风力吹蚀缺乏植被保护的沙质地表,造成土地沙漠化的蔓延.

2.3.2 人为因素对土地沙漠化的影响 人为因素主要包括人口数量、耕地面积、牲畜数量和植被面积.晋西北地区总人口由 1975 年的 109.6×10⁴ 人,经 2000 年的 165.3×10⁴ 人^[15],发展到 2019 年的 147.8×10⁴ 人,1975~2019 年人口密度为 77.18~104.08 人/km,这远高于联合国粮农组织公布的干旱半干旱地区 7~20 人/km 的人口承载标准.庞大的人口数量和过快的人口增长(0.92×10⁴ 人/a)给土地资源和生态环境造成巨大压力,为解决过剩人口的基本生存问题,过度地开发利用植物资源和土地资源,导致了林草地转变为农耕地,土壤遭受风蚀或水蚀,土壤养分流

失,3~5a 后沦为弃耕地,造成土壤系统的破坏和解体.晋西北地区 1975 年耕地面积为 39.67×10⁴hm²,2000 年增加到 56.61×10⁴hm²^[15],2019 年减少到 40.17×10⁴hm²,且 70%为坡耕地和旱地,土壤贫瘠,广种薄收、靠天吃饭,过度开垦或滥垦等现象普遍,这不仅破坏了土壤结构和地表植被,而且加剧了裸露耕地在冬春季节的风蚀过程.晋西北地区牲畜数量 1975~2000 年均增长 7.72×10⁴~13.16×10⁴ 头^[15],受禁牧、圈养等政策的影响,2000~2019 年均减少 5.62×10⁴ 头,天然草地的过牧、滥牧现象严重.牲畜反复的、过度的啃食和践踏,破坏了牧草的群落结构,优质牧草减少近 45%,可食牧草的产量大幅度下降,植株变稀变矮,覆盖度日渐下降,最终造成集中连片的裸露草地.晋西北地区植被面积从 1975 年的 22.96×10⁴hm² 减少到 2000 年的 14.55×10⁴hm²^[15],2019 年增加到 25.05×10⁴hm²,现存的植被多数为次生灌木和草类,人工林及天然灌木林面积较小,植被覆盖率仅为 16.57%,远低于山西省乃至全国水平,处于裸露和半裸露的沙质地表暴露于大风作用之下,造成土地沙漠化的扩展.

2.3.3 沙漠化土地驱动因素的识别 采用主成分分析法(SPSS19.0)分析上述自然因素和人为因素与沙漠化土地的关系.沙漠化土地(Y)的动态变化与耕地面积(x₂)、人口数量(x₁)、降水(x₆)和大风日数(x₇)呈正相关,相关系数(R)分别为 0.917,0.816,0.402,0.354;与植被面积(x₄)、牲畜数量(x₃)、温度(x₅)呈负相关,相关系数(R)分别为-0.937,-0.892,-0.473(表 4).

表 4 沙漠化土地驱动因素的系数矩阵

Table 4 Correlation matrix of variable driving changes in the aeolian desertified land

变量	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	Y
x ₁	1.000							
x ₂	0.798	1.000						
x ₃	0.984	0.747	1.000					
x ₄	-0.852	-0.895	-0.827	1.000				
x ₅	0.734	0.465	0.745	-0.374	1.000			
x ₆	-0.502	-0.525	-0.462	0.457	-0.349	1.000		
x ₇	0.234*	0.436	0.245*	-0.464	-0.072*	-0.074*	1.000	
Y	0.816	0.917	-0.892	-0.937	-0.473	0.402	0.354*	1.000

注: * P < 0.05.

主成分分析将以上 7 个变量简化为 2 个不相关的主成分:第一主成分和第二主成分,它们的特征值

均大于 1,累计贡献率达到 88.504%(>85%)(表 5),能够解释沙漠化土地动态变化的驱动机制^[28-29].第一主成分是人口(x_1)、耕地(x_2)、牲畜(x_3)和植被(x_4)的综合,尽管其系数值有正有负,但系数绝对值均大于 0.90,反映了人为因素对晋西北地区土地沙漠化的

作用,并且人口(x_1)和牲畜(x_3)的系数值最大,是影响沙漠化土地变化的主要人为因素.同理分析,第二主成分是温度(x_5)、降水(x_6)和大风日数(x_7)的综合,反映了自然因素对晋西北地区土地沙漠化的作用,大风日数(x_7)是影响沙漠化土地变化的主要自然因素.

表 5 沙漠化土地驱动因素的特征值和贡献率
Table 5 Eigenvalues and cumulative of components matrix of driving factors in the aeolian desertified land

成分	变量							特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7			
成分 1	0.941	0.914	0.926	-0.918	0.659	-0.601	0.376	4.376	66.543	66.543
成分 2	-0.162	0.286	-0.179	-0.276	-0.575	0.219	0.819	1.254	21.961	88.504

3 结论

3.1 在面积变化上,1975~1991 年晋西北地区沙漠化土地增加 1495.10km²,增加速率为 93.44km²/a; 1991~2000 年沙漠化土地增加 689.09km²,增加速率为 76.57km²/a; 2000~2019 年沙漠化土地面积减少 4297.24km²,减少速率为 214.86km²/a.在监测时段内晋西北地区沙漠化土地面积呈现扩张-再扩张-逆转的发展趋势.

3.2 在面积转移上,1975~1991 年晋西北地区非沙漠化土地转移为轻度沙漠化土地面积最大,为 1506.12km²;1991~2000 年轻度沙漠化土地转移为中度沙漠化土地面积最大,为 11098.72km²; 2000~2015 年中度沙漠化土地转移为轻度沙漠化土地面积最大,为 10569.56km²;2015~2019 年轻度沙漠化土地转移为非沙漠化土地面积最大,为 1909.93km².在监测时段内晋西北地区不同等级沙漠化土地的转换主要发生在非沙漠地、轻度和中度之间.

3.3 在空间尺度上,1975~1991 年、1991~2000 年晋西北地区沙漠化土地重心总体上向偏南或偏东迁移,其中重度沙漠化土地迁移距离最大,分别为 19.26, 20.06km;2000~2019 年晋西北地区沙漠化土地重心向西北迁移,其中轻度沙漠化土地迁移距离最大,为 30.29km.在监测时段内晋西北地区沙漠化土地呈现偏南-偏东南-偏西北的空间迁移趋势.

3.4 1975~2000 年晋西北地区沙漠化土地面积增加、范围扩大、程度加重;2000~2019 年晋西北地区沙漠化土地面积减少、范围缩小、程度减轻.自然因素和人为因素的共同作用诱发了晋西北地区土地

沙漠化动态变化,人口数量和牲畜数量是影响沙漠化土地变化的主要人为因素,大风日数是影响沙漠化土地变化的主要自然因素.

参考文献:

[1] Millennium Ecosystem Assessment Council. Ecosystems and human well-bein: Desertification synthesis [R]. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.

[2] 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.

Duan H C, Wang T, Xue X, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian desertification and landscape pattern in Horqin sandy land:A case study of Naiman Banner in Inner Mongolia [J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(7):917-928.

[3] Gregory S O, Osvaldo E S, Enrique R V, et al. The interactive role of wind and water in functioning of drylands:What does the future hold [J]. BioScience, 2018,68(9):670-677.

[4] 李爱敏,韩致文,黄翠华,等.21 世纪初科尔沁沙地沙漠化程度变化动态监测 [J]. 中国沙漠, 2007,27(4):546-551.

Li A M, Han Z W, Huang C H, et al. Remote sensing monitoring on dynamic of sandy desertification degree in Horqin sandy land at the beginning of 21st century [J]. Journal of Desert Research, 2007,27(4): 546-551.

[5] Wang F, Pan X B, Wang D F, et al. Combating desertification in China: Past,present and future [J]. Land Use Policy, 2013,31(3):311-313.

[6] 刘 拓.中国土地沙漠化经济损失评估 [J]. 中国沙漠, 2006,26(1): 40-46.

Liu T. Desertification economic loss assessment in China [J]. Journal of Desert Research, 2006,26(1):40-46.

[7] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. Nature Climate Change, 2016,6(2):166-171.

[8] Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. Reviews of Geophysics, 2017,55(4):864-901.

[9] Wang X M, Hua T, Lang L L, et al. Spatial differences of aeolian desertification responses to climate in arid Asia [J]. Global and

- Planetary Change, 2017,148(1):22-28.
- [10] Chen T, Bao A M, Jiapaer G L, et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982~2015 [J]. Science of the Total Environment, 2019,653(2):1311-1325.
- [11] Gül E, Erşahin S. Evaluating the desertification vulnerability of a semiarid landscape under different land uses with the environmental sensitivity index [J]. Land Degradation & Development, 2019,30(1): 811-823.
- [12] 马义娟,苏志珠.山西省土地沙漠化现状及发展趋势研究 [J]. 水土保持学报, 2003,17(3):81-84.
- Ma Y J, Su Z Z. Study on sandy desertification of present situation and developmental trend in Shanxi province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(3):81-84.
- [13] 马义娟,钱锦霞,苏志珠.晋西北地区气候变化及其对土地沙漠化的影响 [J]. 中国沙漠, 2011,31(6):1585-1589.
- Ma Y J, Qian J X, Su Z Z. Climate change and its impact on land desertification in northwestern Shanxi province [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(6):1585-1589.
- [14] 薛占金,秦作栋,孟宪文.晋北地区土地沙漠化经济损失初步研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2012,26(4):24-29.
- Xue Z J, Qin Z D, Meng X W. Economic loss of aeolian desertification in north Shanxi province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(4):24-29.
- [15] Xue Z J, Qin Z D, Li H J, et al. Evaluation of aeolian desertification from 1975 to 2010 and its causes in northwest Shanxi province, China [J]. Global and Planetary Change, 2013,107:102-108.
- [16] 秦作栋,王孟本,薛占金.晋北地区土地沙漠化现状及其成因分析 [J]. 水土保持研究, 2008,15(2):168-172.
- Qin Z D, Wang M B, Xue Z J. An analysis of present situation and causes of sandification in north Shanxi province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(2):168-172.
- [17] 陈志诚,龚子同,张甘霖,等.不同尺度的中国土壤系统分类参比 [J]. 土壤, 2004,36(6):584-595.
- Chen Z C, Gong Z T, Zhang G L, et al. Correlation of soil taxa between Chinese soil genetic classification and Chinese soil taxonomy on various scales [J]. Soils, 2004,36(6):584-595.
- [18] 朱震达,崔书红.中国荒漠化土地分布地域特征及其治理措施的评估 [J]. 中国环境科学, 1996,16(5):328-334.
- Zhu Z D, Cui S H. Features of distribution and assessment for control measures of desertification in China [J]. China Environmental Science, 1996,16(5):328-334.
- [19] Yan C Z, Song X, Zhou Y M, et al. Assessment of aeolian desertification trends from 1975's to 2005's in the watershed of the Longyangxia Reservoir in the upper reaches of China's Yellow River [J]. Geomorphology, 2009,112(3/4):205-211.
- [20] Shen W S, Li H D, Sun M, et al. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China from 1975 to 2008 [J]. Global and Planetary Change, 2012,86-87:37-44.
- [21] Wang T, Yan C Z, Song X, et al. Monitoring recent trends in the area of aeolian desertified land using landsat images in China's Xinjiang region [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012,68(1):184-190.
- [22] Duan H C, Wang T, Xue X, et al. Dynamic monitoring of aeolian desertification based on multiple indicators in Horqin Sandy Land, China [J]. Science of the Total Environment, 2019,650(2):2374-2388.
- [23] 段翰晨,王 涛,薛 娟,等.基于 RS 与 GIS 的科尔沁沙地沙漠化时空演变 [J]. 中国沙漠, 2013,33(2):470-477.
- Duan H C, Wang T, Xue X, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian desertification in the Horqin sandy land based on RS and GIS [J]. Journal of Desert Research, 2013,33(2):470-477.
- [24] 张 靖,牛建明,同丽嘎,等.多水平/尺度的驱动力变化与沙漠化之间的关系-以内蒙古乌审旗为例 [J]. 中国沙漠, 2013,33(6):1643-1653.
- Zhang J, Niu J M, Tong L G, et al. A multilevel/multiscale analysis of the impact of land use drivers on desertification: A case study of Uxin Banner, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research, 2013, 3(6):1643-1653.
- [25] Liu D L, Li B C, Liu X Z, et al. Monitoring land use change at a small watershed scale on the Loess Plateau, China: Applications of landscape metrics, remote sensing and GIS [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,64(8):2229-2239.
- [26] Zhang F, Tashpolat T, Verner C J, et al. Evaluation of land desertification from 1990 to 2010 and its causes in Ebinur Lake region, Xinjiang China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(9):5731-5745.
- [27] Qi Y B, Chang Q R, Jia K L, et al. Temporal-spatial variability of desertification in an agro-pastoral transitional zone of northern Shaanxi Province, China [J]. Catena, 2012,88(1):37-45.
- [28] Hu M J, Pan N H, Li X F, et al. Quantitative analysis of driving forces to land desertification in Maqu plateau during 1964-2014 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(4):250-256.
- [29] Tian L H, Zhang D S, Hu M J, et al. Driving forces of land aeolian desertification in Gangcha County of Qinghai Province, China, during 1976-2007 [J]. Journal of Desert Research, 2013,33(2):493-500.

作者简介: 薛占金(1971-),男,山西广灵人,副教授,博士,主要从事生态恢复与资源持续利用研究.发表论文 30 余篇.