1975—2015 年鄂尔多斯市沙漠化的时空演变过程

冯 坤[1,2]，颜长珍[1]，谢家丽[1]，钱大文[1,2]
（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘要：鄂尔多斯市地处温带草原向荒漠草原过渡的半干旱区，是中国沙漠化问题较为严重的区域之一，其土地沙漠化发展和逆转过程及影响因素在北方农牧交错带具有代表性。以 7 期 Landsat 卫星遥感数据为信息源提取沙漠化土地类型及程度的时空格局信息，分析了该地区自 1975 年以来的土地沙漠化过程，并结合气象及社会经济数据采用主成分分析法对驱动因子进行定量分析。结果表明：在脆弱生态环境背景下，鄂尔多斯市土地沙漠化受人口数量增加、过垦及过牧等人为因素的严重影响。不同时段土地沙漠化发展的方向与驱动力都有所不同，1975—2000 年是土地沙漠化的急剧发展期，驱动力以人为因素为主导，自然因素为基础；2000—2015 年是土地沙漠化的逆转期，驱动力以自然因素为主，人为因素为辅。

关键词：沙漠化；驱动力；主成分分析；鄂尔多斯市
文章编号：1000-694X(2018)02-0233-10 **DOI：**10.7522/j.issn.1000-694X.2018.00002
中图分类号：P931.3 **文献标志码：**A

0 引言

沙漠化是干旱、半干旱及部分半湿润地区由于人地关系不相协调造成的以风沙活动为主要标志的土地退化[1]，其分布以及发展会对所在区域产生诸多危害，例如沙尘暴发生、植被退化和耕地生产力下降等[2]。中国作为全球沙漠和沙漠化土地分布较多的国家，沙漠化对生态、水文和农业等方面均造成严重危害。沙漠化成因、变化以及防治等，也一直是多学科的研究重点和热点之一[3]。自 20 世纪 80 年代开始，中国就逐步开展了对沙漠化成因的研究及沙漠化过程的监测工作，其中对沙漠化过程的监测是其他研究的基础。遥感技术由于其时效性和空间覆盖大的特点，成为沙漠化监测的主要应用手段[1,4-6]。在沙漠化时空格局监测的基础上，进行沙漠化驱动因素分析是理解其变化和进行防治的前提，沙漠化的成因可分为自然和人为因素[7-13]，主要的研究方法有主分成分析[9,14-15]、回归分析[16]、关联度分析[17]及景观指数分析[18-19]等。已有研究中，大多采用单一时间点进行驱动因子与沙漠化的关系分析，如采用面积评估沙漠化程度的变化[1,4-6,9-11,14-15,17-18,20-22]，也有选取不同的沙漠化指数作为沙漠化程度的评估指标[7,23]，但缺少驱动因子的集成，难以进行沙漠化过程和驱动机制的综合分析。

鄂尔多斯市地处干旱和半干旱过渡区的农牧交错带，是中国沙漠化问题较为严重和典型的区域，而气候变化和人类活动双重作用使本区沙漠化过程及其驱动因素具有显著的空间异质性[24]，在农牧交错带也具有典型的代表性。以 1975—2015 年鄂尔多斯市沙漠化过程为研究对象，结合自然因素时间序列上的累加效应和人为因素的阶段性影响作用，以沙漠化指数 *ADI* 作为衡量沙漠化程度的指标，利用主成分分析法研究沙漠化正逆过程与气候变化和人类活动的关系，明确了近 40 a 沙漠化过程及其驱动机制。

1 研究区概况

鄂尔多斯市位于 37°37′—40°53′ N 、106°27′—111°27′ E，地处内蒙古自治区西南部的鄂尔多斯高原（图 1），总面积为 8.68 万 km^2。研究区分布有毛乌素沙地和库布齐沙漠，处于温带草原向荒漠草原过渡的半干旱区，属于典型的温带大陆性气候，是畜牧业向农业的过渡区和干旱、半干旱的气候过渡带[25]。本区年降水量为 170～490 mm，自东南向西北递减，年均气温为 5.5～8.7 ℃，年蒸发量为2 000～3 000 mm。鄂尔多斯市属于生态脆弱区，土地沙漠化过程及影响因素在中国北方地区极具代表

收稿日期：2017-10-27；**改回日期：**2018-01-30
资助项目：国家自然科学基金项目(41171400)；国家重点研发计划项目(2016YFC0500201)
作者简介：冯坤(1992—)，男，甘肃庆阳人，硕士研究生，研究方向为遥感应用、沙漠化监测。E-mail：fengkun@lzb.ac.cn

性[10]。近年来，为了防止沙漠化的进一步发展，政府加大了治理力度，包括工程治沙、生态防沙[26]以及围封禁牧等政策的实施，致力于恢复区域生态环境。

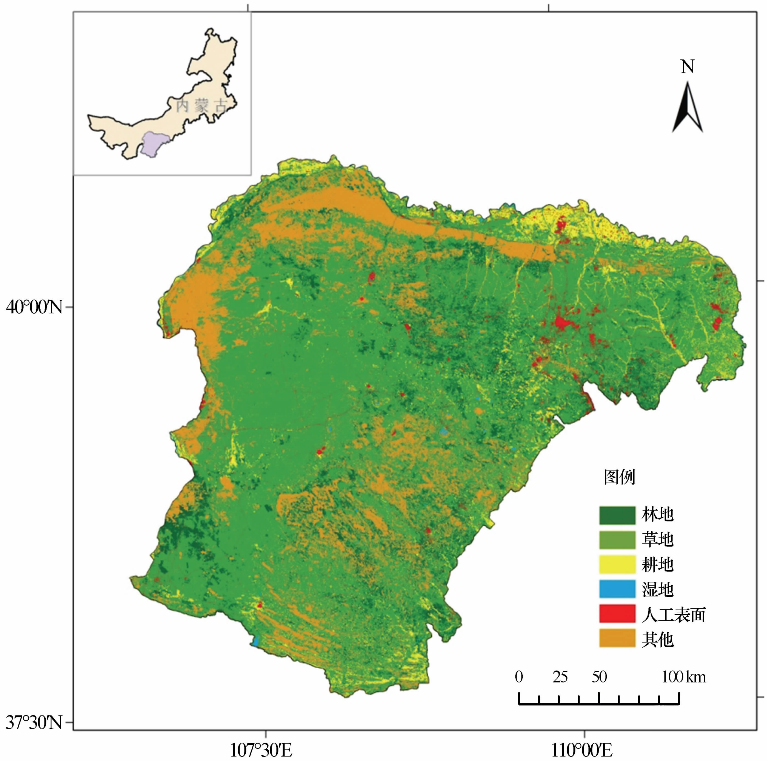

图 1　研究区土地覆被现状

Fig. 1　Land cover of the studied area

2　数据与方法

2.1　数据来源与预处理

以 Landsat 系列数据作为主要信息源，包括 1975 年 MSS 影像，1990、1995、2005 和 2010 年 TM 影像，2000 年 ETM 影像及 2015 年 OLI 影像。具体确定时，主要选取植被生长较为旺盛的夏秋季节(6—10 月)且云量小于 10%的影像，以便于沙漠化信息的识别与提取。为了突出土地沙漠化特征、有较好视觉效果，采用多波段标准假彩色数据融合方法，对地表信息加以明显区分。利用遥感影像处理软件 ERDAS，并根据 1∶10 万地形图对影像进行几何校正处理和投影转换，校正后影像空间分辨率为 30 m，平原地区误差小于 1 个像元，山区小于 1.5 个像元[27]。然后在 GIS 和 RS 的技术支持下，对影像进行人机交互目视解译，通过野外验证并结合 Google Earth 高分辨率影像提高解译精度。

研究区 1966—2015 年的气象数据来源于国家气象信息中心，具体包括年降水量、年平均气温、年平均风速等多个气象指标；耕地面积、牲畜量及人口数量等社会经济数据来源于内蒙古自治区历年的统计年鉴[28]。

沙漠化程度划分为轻度、中度、重度和极重度 4 个等级，并结合研究区的原始地表景观和生态系统情况，以风成地表形态为主，结合沙漠化土地特征、沙漠化成因、植被、景观、地貌等环境要素，构建适合该研究区的沙漠化土地分类系统[18](表 1)。

2.2　研究方法

2.2.1　沙漠化指数

为了既能评估沙漠化土地面积，又能监测沙漠化程度变化，给不同程度的沙漠化类型赋予不同的权重，使评价结果更加精确，本文采用沙漠化指数 ADI(Aeolian Desertification Index)作为沙漠化评价的量化指标[16]。

$$ADI=(S_{SL}+2S_M+3S_S+4S_{VS})/S_A \quad (1)$$

式中：ADI 为沙漠化指数；S_{SL} 为轻度沙漠化土地面积；S_M 为中度沙漠化土地面积；S_S 为重度沙漠化土地面积；S_{VS} 为极重沙漠化土地面积；S_A 为研究区总土地面积。ADI 值的范围为 0～4。$ADI=0$，代表研究区无任何沙漠化土地；$ADI=4$，代表研究区全

表 1　沙漠化土地分类系统

Table 1　Classification system of aeolian desertification land

沙漠化程度	流沙面积/%	植被覆盖度/%	景观特征
轻度沙漠化	＜5	＞60	固定沙丘迎风坡出现风蚀坑,流沙斑点状分布,灌丛下出现流沙堆积,并形成各种形态的沙嘴,春季垄沟有少量积沙,耕垄有明显的风蚀痕迹
中度沙漠化	5～25	30～60	地面以片状风蚀为主,沙丘出现明显的风蚀坡和落沙坡分布,灌丛有叶期仍不能覆盖整个沙堆,灌丛沙堆迎风侧显现流沙,耕地出现明显小片流沙
重度沙漠化	25～50	10～30	原始地表形态基本破坏,地表风蚀强烈,沙地成为半流动状态,灌丛开始大片死亡,风蚀耕地腐殖质层几乎蚀净,耕地大部分弃耕
极重度沙漠化	＞50	＜10	流动沙丘和风蚀劣地大面积分布,几乎无植被或有少量植被覆盖

部为极重度沙漠化土地。通过 1975 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年及 2015 年 7 期沙漠化遥感影像解译结果并结合公式(1)来评价近 40 a 来鄂尔多斯市的土地沙漠化过程。

2.2.2　湿润指数

本文采用地表湿润指数 SWI[29] (Surface Wetness Index) 作为气候暖干(湿)化指标进行分析评价。

$$SWI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i}{\sum_{i=1}^{12} PE_i} \tag{2}$$

式中:P_i 与 PE_i 分别为月降水量与潜在蒸散量。$SWI<0.05$ 为极端干旱区,$0.05 \leqslant SWI < 0.20$ 为干旱区,$0.20 \leqslant SWI < 0.50$ 为半干旱区,$0.50 \leqslant SWI < 0.65$ 为半湿润干旱区,$SWI \geqslant 0.65$ 为湿润区。

2.2.3　沙漠化驱动因素分析

土地沙漠化受自然因素和人为因素的双重影响,是受多变量综合性影响的一个过程。自然因素选取鄂尔多斯市范围内的鄂托克旗、伊金霍洛旗、东胜和包头 4 个气象站点的 1966—2015 年近 50 年的年降水量、年平均气温和年平均风速为分析指标。鄂尔多斯市畜牧业比较发达,农业活动也较为活跃[16],人为因素主要选取 1975—2015 年近 40 年的年耕地面积、年牲畜量和人口数量进行分析。由于沙漠化受自然因素累加效应的影响[7],采用滑动平均法对鄂尔多斯的自然因子做 1～10 a 的滑动平均处理,并得到与沙漠化指数 ADI 关联度最好的滑动平均值。

主成分分析法可以在关系错综复杂的变量中找出影响变量的共同因素和特殊因素,从而用若干独立的、数目较少的新变量来表达原始数据,用较少的变量指标分析结果,取得较好的降维效果,简化了分析因素但又能反映尽量多的信息[14]。主成分分析法用在沙漠化驱动力评价中可量化不同影响因素的贡献率,进而发现主导因素,揭示影响区域沙漠化过程的主要成因。本研究中选取的影响因素包括:年降水量(X_1)、年平均气温(X_2)、年最高气温(X_3)、年最低气温(X_4)、年平均风速(X_5)、牲畜量(X_6)、耕地面积(X_7)及人口数量(X_8)。

3　结果与分析

3.1　沙漠化时空格局

3.1.1　沙漠化土地面积变化特征

以 2000 年为转折点,近 40 年鄂尔多斯市沙漠化土地呈先增加后减少的态势(表 2)。其中,极重度沙漠化土地面积也呈现此趋势。

1975—1990 年沙漠化发展迅速,除了轻度沙漠化土地面积有所减少外,其他类型沙漠化土地面积均大幅增加,净增加面积达9 044.46 km^2。该时期农牧生产活动频繁,在 20 世纪 70 年代末为了扩大粮食种植面积,该地区就将原先的草甸草场作为耕地使用,环境恶化,沙漠化程度加重[30]。1990—1995 年为沙漠化缓慢发展过程,但极重度沙漠化土地面积增加较多。1995—2000 年又迎来急剧发展期,主要是极重度沙漠化土地类型的贡献,增加发生在荒漠草原局部地区,该时期人口增幅较大,增加约 142 647人,开荒耕种现象严重,耕地面积急剧增加约 20.28 万 hm^2,增长率达 80%(图 4)。相反,中度和重度沙漠化面积有不同程度的减少。2000 年以后沙漠化开始明显逆转。2000—2005 年为大幅逆转过程,净逆转面积为 664.45 km^2,主要逆转类型为极重度沙漠化土地,逆转面积达7 172.03 km^2,其余类型均为增加状态。这与罗君等[11]的研究结果一致,该时期沙漠化的逆转在气候条件的基础上,围封禁牧、退耕还林(草)等政策的实施及其与有利气

表 2 鄂尔多斯市不同时期沙漠化土地面积及其变化

Table 2 Changes of aeolian desertification land areas of Ordos in different periods

年代		极重度沙漠化	重度沙漠化	中度沙漠化	轻度沙漠化	合计
1975 年	面积/km²	14 991	7 810	12 844	18 324	53 970
	比例/%	27.78	14.47	23.80	33.95	100.00
1990 年	面积/km²	18 080	13 609	14 880	16 446	63 014
	比例/%	28.69	21.60	23.61	26.10	100.00
1995 年	面积/km²	18 608	13 758	14 564	16 496	63 426
	比例/%	29.34	21.69	22.96	26.01	100.00
2000 年	面积/km²	22 451	13 198	14 179	16 953	66 781
	比例/%	33.62	19.76	21.23	25.39	100.00
2005 年	面积/km²	15 279	15 047	17 322	18 468	66 116
	比例/%	23.11	22.76	26.20	27.93	100.00
2010 年	面积/km²	11 071	17 705	18 184	19 103	66 062
	比例/%	16.76	26.80	27.52	28.92	100.00
2015 年	面积/km²	10 744	17 871	18 143	19 272	66 032
	比例/%	16.27	27.06	27.48	29.19	100.00
1975—1990 年	面积变化/km²	3 088	5 799	2 035	−1 879	9 044
1990—1995 年	面积变化/km²	528	148	−316	50	411
1995—2000 年	面积变化/km²	3 843	−560	−386	457	3 355
2000—2005 年	面积变化/km²	−7 172	1 850	3 143	1 515	−664
2005—2010 年	面积变化/km²	−4 208	2 657	861	635	−54
2010—2015 年	面积变化/km²	−327	167	−40	170	−31

候条件的耦合进一步加快了区域沙漠化的逆转，使沙漠化土地得到一定程度的改善。2005—2010 年仍然呈现以极重度沙漠化土地逆转为主。2010—2015 年为缓慢逆转过程，其中极重度和中度沙漠化土地均有所逆转。总体来看，自 2000 年以来由于人们沙漠化治理意识的提高和国家防沙、治沙工程的实施，鄂尔多斯市沙漠化土地呈现长期逆转的态势。

3.1.2 不同程度沙漠化土地转移特征

通过对 7 个时期沙漠化数据进行空间叠加分析，得到 6 个时段的沙漠化土地转移矩阵(表 3)。

1975—1990 年重度和极重度沙漠化土地面积增加最为显著，其中重度沙漠化土地面积的增加由轻度、中度和非沙漠化土地的转入；极重度沙漠化土地的增加来自中度以及非沙漠化土地。中度沙漠化土地面积增加虽不及重度和极重度沙漠化土地面积的增加，但净增加的主要贡献是轻度沙漠化土地。非沙漠化土地面积减少多达9 266.01 km²。该时期沙漠化程度急剧加重，沙漠化面积扩张明显，沙漠化恶化趋势加剧。

1990—1995 年主要表现为中度沙漠化土地面积的减少和极重度沙漠化的土地面积的增加。中度沙漠化土地面积主要转化为重度、极重度沙漠化土地和轻度沙漠化土地；极重度沙漠化土地面积主要由中度、重度和非沙漠化土地转化而来。但该时期也有极重度沙漠化土地转化为中度和重度沙漠化土地，只是极重度沙漠化土地面积的减少小于增加，并且非沙漠化土地面积仍在减少。所以，该时期沙漠化处于缓慢发展阶段。

1995—2000 年不同程度沙漠化土地之间均有相互转化。综合计算得知，中度和重度沙漠化面积有所减少，但极重度沙漠化面积的增加远大于其减少的面积，净增加达到3 843.37 km²，而且非沙漠化土地面积减少了4 220.79 km²。该时期沙漠化土地处于急速发展阶段，沙漠化面积继续扩张，但局部有逆转现象。

2000—2005 年表现出明显的沙漠化逆转过程。包括大面积的中度沙漠化土地向轻度沙漠化土地的转化，重度沙漠化土地向轻度、中度沙漠化土地的转

表 3　鄂尔多斯市不同类型沙漠化土地转移矩阵(km²)

Table 3　Transition matrix of different types of aeolian desertification land in Ordos (km²)

年代	类型	轻度沙漠化	中度沙漠化	重度沙漠化	极重度沙漠化	非沙漠化	总计
1975—1990 年	轻度沙漠化	11 334	3 515	2 757	714	4	18 324
	中度沙漠化	1 986	8 049	1 726	1 029	54	12 844
	重度沙漠化	151	103	6 817	728	10	7 810
	极重度沙漠化	96	172	433	14 137	153	14 991
	非沙漠化	2 879	3 040	1 875	1 472	23 612	32 878
	总计	16 446	14 880	13 609	18 080	23 834	86 848
1990—1995 年	轻度沙漠化	16 231	24	95	89	7	16 446
	中度沙漠化	203	14 136	329	201	11	14 880
	重度沙漠化	44	248	12 794	478	46	13 609
	极重度沙漠化	18	132	197	17 698	35	18 080
	非沙漠化	1	25	342	142	23 324	23 834
	总计	16 496	14 564	13 758	18 608	23 422	86 848
1995—2000 年	轻度沙漠化	10 760	2 432	1 720	1 416	169	16 496
	中度沙漠化	2 464	7361	2 441	2 044	254	14 564
	重度沙漠化	1 774	2 090	6 601	2 985	308	13 758
	极重度沙漠化	569	1 029	1 798	1 5076	136	18 608
	非沙漠化	1 386	1 266	637	931	19 201	23 422
	总计	16 953	14 179	13 198	22 451	20 067	86 848
2000—2005 年	轻度沙漠化	16 371	242	7	12	321	16 953
	中度沙漠化	1 093	12 643	178	42	223	14 179
	重度沙漠化	524	2 204	10 234	79	156	13 198
	极重度沙漠化	467	2 206	4 557	15 137	84	22 451
	非沙漠化	13	27	71	8	19 948	20 067
	总计	18 468	17 322	15 047	15 279	20 732	86 848
2005—2010 年	轻度沙漠化	16 795	128	1 420	39	85	18 468
	中度沙漠化	1 785	15 271	177	31	58	17 322
	重度沙漠化	316	2 147	12 082	439	62	15 047
	极重度沙漠化	199	623	3 919	10 510	28	15 279
	非沙漠化	7	15	107	51	20 552	20 731
	总计	19 103	18 184	17 705	11 071	20 786	86 848
2010—2015 年	轻度沙漠化	18 922	74	29	24	53	19 103
	中度沙漠化	248	17 815	53	25	43	18 184
	重度沙漠化	81	193	17 321	40	70	17 705
	极重度沙漠化	19	56	382	10 584	3	11 071
	非沙漠化	4	4	86	72	20 620	20 786
	总计	19 273	18 143	17 871	10 744	20 816	86 848

化及极重度沙漠化土地向轻度、中度、重度沙漠化土地的转化。非沙漠化面积没有明显增加。所以,该时期沙漠化土地处于快速逆转过程,沙漠化程度明显减轻。

2005—2010 年主要表现为沙漠化逐程度转化的过程,即极重度沙漠化→重度沙漠化→中度沙漠化→轻度沙漠化的转化模式。包括中度沙漠化土地向轻度沙漠化土地的转化、重度沙漠化土地向中度

沙漠化土地的转化及极重度沙漠化土地向重度沙漠化土地的转化，总体呈现沙漠化逆转趋势。但也有1 419.93 km² 的轻度沙漠化土地转化为重度沙漠化土地。该时期整体呈现稳定逆转趋势，但局部存在沙漠化恶化现象。

2010—2015年仍然表现为逐程度转化的过程。包括中度沙漠化土地向轻度沙漠化土地的转化、重度沙漠化土地向中度沙漠化土地的转化及极重度沙漠化土地向重度沙漠化土地的转化，总体呈现沙漠化缓慢逆转趋势。

3.1.3 区域土地沙漠化综合变化特征

将7期沙漠化数据分两个阶段分别做空间叠加分析，得到1975—2000年和2000—2015年的沙漠化空间动态分布图(图2)。1975—2000年沙漠化整体呈现恶化发展趋势，空间上主要体现在中西部毛乌素沙地及库布齐沙漠分布区域；2000—2015年沙漠化出现大幅度逆转，局部有发展态势，空间上体现在鄂尔多斯市中部地区。

结合1975—2015年7期沙漠化土地数据及沙漠化指数 *ADI* 计算得到鄂尔多斯市近40 a沙漠化指数变化图(图3)。1975—2015年期间鄂尔多斯市平均沙漠化指数 *ADI* 为1.747±0.280，沙漠化程度较为严重，其中2000年沙漠化程度最高，*ADI* 为2.027。1975—2000年鄂尔多斯市沙漠化处于发展期，沙漠化程度加重；2000—2015年研究区沙漠化处于逆转期，沙漠化程度明显减轻。此外，鄂尔多斯市沙漠化变化趋势的回归分析可以看出，相关性检验较为显著($R^2=0.822$)。与面积变化相比，*ADI* 能更直观、更精确地反映出沙漠化程度变化趋势。

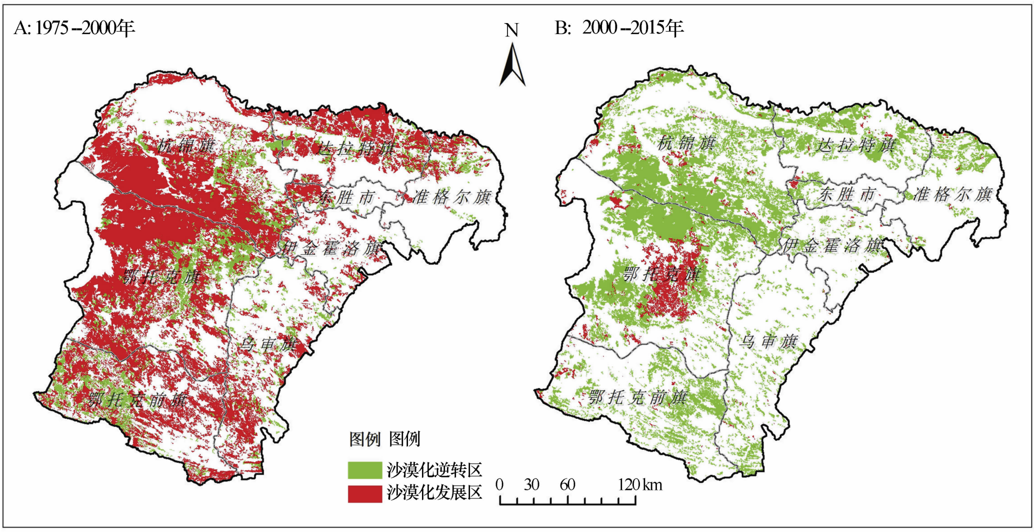

图2 1975—2015年鄂尔多斯市土地沙漠化动态变化

Fig. 2 Dynamic variation of aeolian desertification land in Ordos from 1975 to 2015

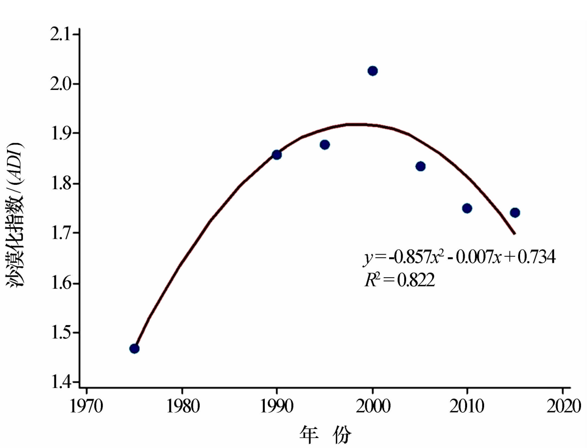

图3 1975—2015年鄂尔多斯市沙漠化指数变化

Fig. 3 *ADI* changing trend in Ordos from 1975 to 2015

3.2 沙漠化成因

3.2.1 土地沙漠化影响因子

在影响沙漠化的气候条件中，气温、降水和风力状况与沙漠化的关系最为密切[31]。鄂尔多斯市近40年来，年平均气温为(7.1±1.6)℃，呈逐渐增加的趋势；年最高气温为波浪式递增，而年最低气温变化趋势较为平缓；与年平均气温相比，鄂尔多斯市年降水量变化较为复杂，近40年来年降水量为(333.5±164.0)mm，在时间序列上的变化无明显规律；而鄂尔多斯市年平均风速则呈现明显的减弱趋势，近40年来年平均风速为(2.85±0.85)m·s^{-1}，但2010年以后风速有一定程度增强(图4)。

人口、土地承载力与沙漠化的关系研究是沙漠化发生、发展研究的主要内容，它不仅在阐述沙漠化成因和沙漠化综合整治中有重要的理论意义，而且在人地关系和土地利用研究中也成为一个主要的评判体系[8]。鄂尔多斯市近 40 年耕地面积呈现先减少后增加再趋于平稳的过程，这与 1980 年开始实行的土地联产承包责任制及 2000 年开始实施的围封禁牧、退耕还林还草政策相吻合；而鄂尔多斯市的人口数量在 40 年来处于平稳的缓慢增长过程，2009 年以后随着城市化进程的加快，人口流动也随着加大，该地区人口出现急增现象；鄂尔多斯市近 40 年牲畜量在 1975—2000 年趋于稳定，2000 年以后出现剧增。

在各自然影响因子 1～10 a 的滑动平均值与沙漠化指数 ADI 的关联分析后，得到与沙漠化过程关联程度最高的年降水量 5 a 累加效应、年平均气温 3 a 累加效应、年最高气温 2 a 累加效应、年最低气温 9 a 累加效应、年平均风速 5 a 累加效应。

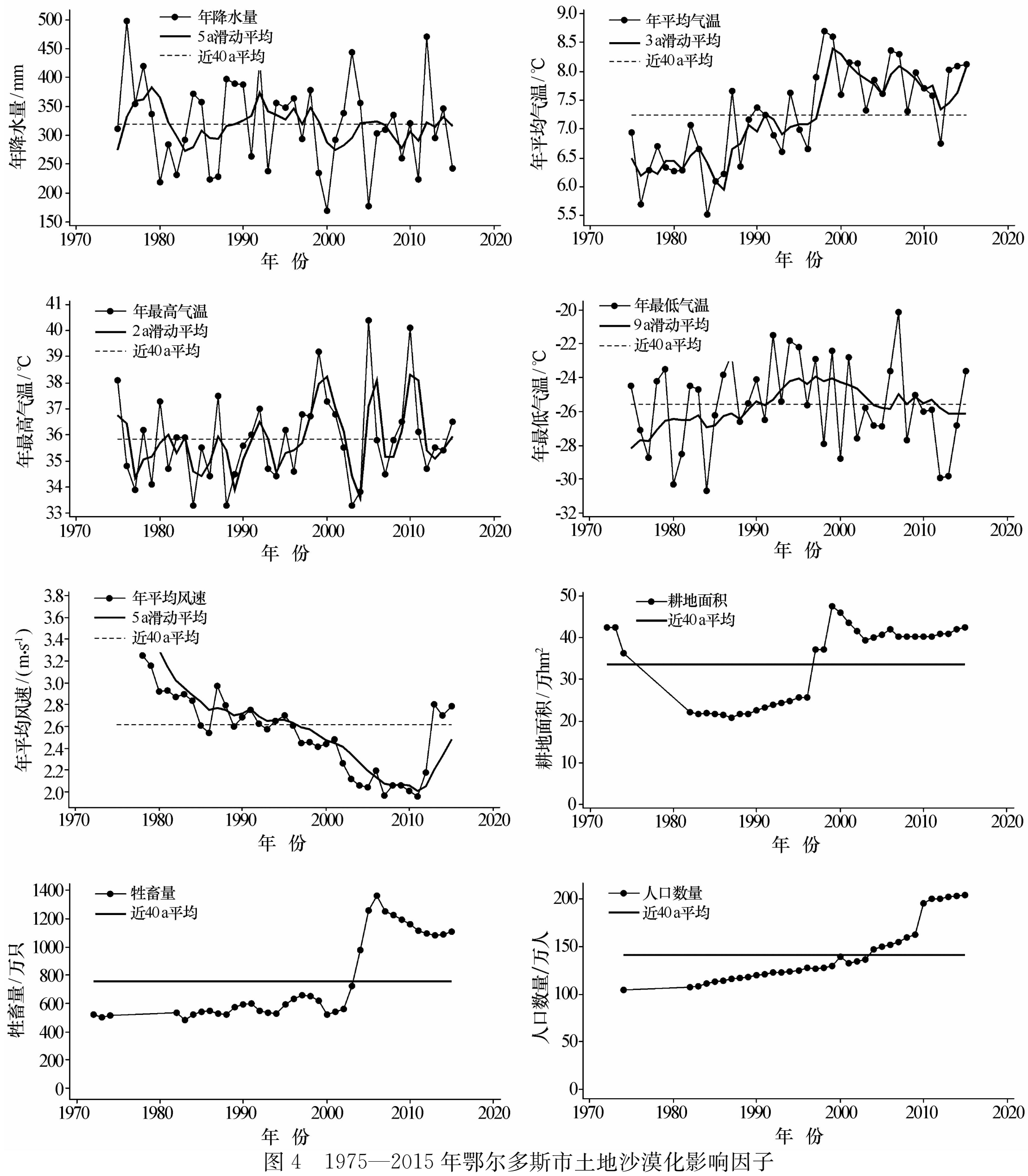

图 4　1975—2015 年鄂尔多斯市土地沙漠化影响因子

Fig. 4　The driving factors in land desertification in Ordos from 1975 to 2015

3.2.2　近 40 a 土地沙漠化驱动力

利用所选择的 8 个影响因子，包括年降水量(X_1)、年平均气温(X_2)、年最高气温(X_3)、年最低气温(X_4)、年平均风速(X_5)、牲畜量(X_6)、耕地面积(X_7)及人口数量(X_8)，其中自然影响因子年降水量选择 5 a 滑动平均值，年平均气温选择 3 a 年滑动

平均值，年最高气温选择 2 a 滑动平均值，年最低气温选择 9 a 滑动平均值，年平均风速选择 5 a 滑动平均值。根据研究区近 40 年的统计与观测数据，选取大于 1 的特征根，并且累计贡献率大于 60%的主成分因子进行主成分载荷分析(表 4)。

表 4 1975—2015 年鄂尔多斯市沙漠化影响因子主成分载荷矩阵

Table 4 The PC load matrix of driving factors in land desertification in Ordos from 1975 to 2015

变量	PC1	PC2
年降水量(X_1)	−0.160	−0.095
年平均气温(X_2)	0.439	−0.230
年最高气温(X_3)	0.231	−0.292
年最低气温(X_4)	0.264	−0.711
年平均风速(X_5)	−0.430	0.013
牲畜量(X_6)	0.386	0.460
耕地面积(X_7)	0.404	0.056
人口数量(X_8)	0.402	0.364
特征根	4.365	1.098
贡献率/%	54.60	13.70
累积贡献率/%	54.60	68.30

从主成分贡献率来看，前两个主成分的累积贡献率达 68.3%，各主成分可解释信息量的贡献率分别为 54.6%、13.7%，这足以解释土地沙漠化的发展过程。由主成分载荷矩阵可知，1975—2015 年鄂尔多斯市土地沙漠化过程是由自然因素和人为因素的综合作用引起的。在作为主要指标的第一主成分中，变量的贡献率为 54.6%，年平均气温(X_2)、年平均风速(X_5)、牲畜量(X_6)、耕地面积(X_7)及人口数量(X_8)的载荷较高，表明各变量虽在作用方向上不同，但对沙漠化的发展具有同等效力和作用[14]。第一主成分反映了自然因素和人为因素对土地沙漠化的综合作用；第二主成分主要反映了年最低气温(X_4)、牲畜量(X_6)和人口数量(X_8)的作用(表 5)。结合鄂尔多斯市近 40 a 土地沙漠化驱动因子变化图(图 4)，鄂尔多斯市近 40 年年平均气温的持续上升、年最高气温的波浪式升高、人口的稳步增加、牲畜量的先增后减、年平均风速的持续减弱后小幅增强及耕地面积的剧增到减少再趋于稳定的变化过程均对土地沙漠化的发展产生阻碍或促使作用。在自然因素的影响下，加上人为的过度放牧→围牧禁牧→科学放牧、过度开荒→退耕还草和生态破坏→生态建设等过程的影响，鄂尔多斯市的土地沙漠化呈现出恶化到逆转的一个过程。

3.2.3 不同时期土地沙漠化驱动力

根据图 3，鄂尔多斯市沙漠化程度在时间序列上表现为加重到减缓的过程，因此选取 2000 年作为分界线，分别研究在沙漠化发展和逆转过程中影响沙漠化过程的主导因素。选取大于 1 的特征根，根据累计贡献率大于 80%的主成分因子选取原则，提取 1975—2000 年、2000—2015 年两个时间段的主成分进行载荷分析(表 5)。

表 5 鄂尔多斯市不同时段的沙漠化影响因子主成分载荷矩阵

Table 5 The PC load matrix of driving factors in land desertification in Ordos in different periods

变量	1975—2000 年			2000—2015 年		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
年降水量(X_1)	−0.008	−0.077	−0.939	−0.359	0.301	0.322
年平均气温(X_2)	0.444	0.132	−0.030	0.386	0.008	−0.076
年最高气温(X_3)	0.273	0.591	0.092	0.137	0.450	−0.686
年最低气温(X_4)	0.273	−0.251	−0.104	0.440	−0.248	−0.208
年平均风速(X_5)	−0.379	0.409	−0.248	0.331	0.309	0.543
牲畜量(X_6)	0.339	−0.173	−0.148	−0.420	0.020	−0.273
耕地面积(X_7)	0.284	0.588	−0.116	0.324	0.617	0.042
人口数量(X_8)	0.454	−0.146	0.032	−0.344	0.412	−0.067
特征根	4.419	1.501	1.087	4.056	1.295	1.254
贡献率/%	55.20	18.80	13.60	50.70	16.20	15.70
累积贡献率/%	55.20	74.00	87.60	50.70	66.90	82.60

从主成分载荷矩阵可知，在 1975—2000 年的沙漠化发展期，第一主成分的贡献率为 55.2%，主要反映了人口数量(X_8)、年平均气温(X_2)、年平均风速(X_5)和牲畜量(X_6)的信息，它们的载荷分别是

0.454、0.444、−0.379和 0.339,其中人口数量(X_8)的载荷最大,人口的增加占主导作用;第二主成分的贡献率较低,为 18.8%,但年最高气温(X_3)和耕地面积(X_7)的载荷相对很高,这说明沙漠化程度的发展在自然因素的基础上,人为因素占居主导地位。长期以来气温的持续上升,加速了沙漠化的发展[32]。另外 1980 年以来土地联产承包责任制的实施,提高了农民农业生产的积极性,但不合理的过度开荒、垦种现象不断出现,使得生态脆弱的农牧交错区的沙漠化不断恶化。在该时间段气温呈明显上升趋势、年降水量呈波动式下降趋势(图 4)。结合徐小玲等[33]的研究及研究区的湿润指数图(图 5),该时期气候呈现暖干化,再加上人口数量和耕地面积的持续增加,破坏了土地结构,促使荒漠草原生态系统的退化,加剧了鄂尔多斯市沙漠化的发展。综合分析可知该时间段的沙漠化发展是在气温升高、降水减少的基础上,人为活动主导的结果。

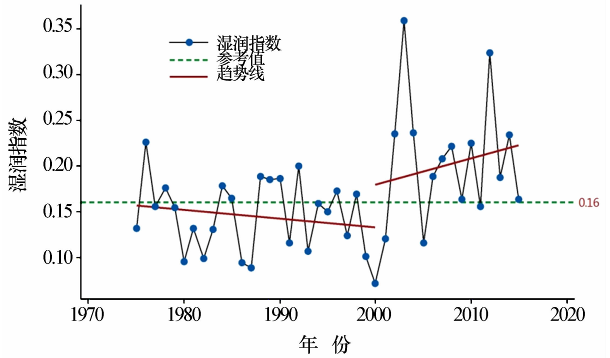

图 5　1975—2015 年鄂尔多斯市湿润指数

Fig. 5　The wetness index in Ordos from 1975 to 2015

从主成分载荷矩阵可知,在 2000—2015 年的沙漠化逆转期,第一主成分的贡献率为 50.7%,主要反映了年最低气温(X_4)、牲畜量(X_6)、年平均气温(X_2)和年降水量(X_1)的信息,它们的载荷分别是 0.440、−0.420、0.386 和−0.359,主要是自然因素的作用;第二主成分的贡献率较低为 16.2%,主要反映了耕地面积(X_7)的信息。第三主成分的贡献率较低为 15.7%,主要反映了年平均气温(X_2)的信息。在该时间段,沙漠化逆转的过程中自然因素的贡献大于人为因素的贡献,气温较 2000 年有一定幅度的回落,降水呈现波动增加趋势(图 4)。根据图 5,研究区在该时段内气候变化趋于暖干向暖湿的过渡,有利于沙漠化的逆转。这与胡永宁等[34]的研究结果一致。一定程度上"三北防护林"等众多生态工程的建设促进了区域气候变湿[35],再加之 2000 年开始围封禁牧及退耕还林(草)政策的实施减轻了草场压力,使土地沙漠化明显减缓。因此,人为因素在本时段沙漠化逆转的过程中起着重要作用。

4　结论

1975—2015 年鄂尔多斯市土地沙漠化总体呈现出发展→逆转的趋势,沙漠化过程受自然因素和人为因素共同影响,但在不同时段土地沙漠化发展和逆转的驱动因素不同。其中,1975—2000 年气候趋于暖干化,土地沙漠化的发展在自然因素的基础上,人为因素起主导作用;2000—2015 年气候开始转向暖湿化,土地沙漠化的逆转主要是自然因素的作用,但人为因素在短期内影响作用显著。

基于 GIS 和 RS 的技术,对遥感影像进行人机交互目视解译,获取土地沙漠化时空信息。所以在后续研究中可以通过提高解译精度的方法,精确分析沙漠化成因。采用自然因素的累加效应进行主成分分析,避免了单一时间点环境因素对沙漠化影响的偶然性。采用沙漠化指数 *ADI* 作为评定沙漠化程度的指标,能进一步增强分析结果的可信度。

近年来,鄂尔多斯市沙漠化总体呈现逆转趋势,但局部仍有发展的隐患存在。这需要人类提高生态保护意识,科学合理地进行农牧生产,建立人与自然和谐发展的体系,推动区域生态环境的健康发展,促进沙漠化的进一步逆转。

参考文献:

[1]　王涛,宋翔,颜长珍,等. 近 35 a 来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. 中国沙漠,2011(6):1351−1356.

[2]　王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——2. 沙漠化的研究内容[J]. 中国沙漠,2003(5):1−6.

[3]　王涛,朱震达,赵哈林. 我国沙漠化研究的若干问题——4. 沙漠化的防治战略与途径[J]. 中国沙漠,2004(2):3−11.

[4]　吴薇. 近 50 a 来科尔沁地区沙漠化土地的动态监测结果与分析[J]. 中国沙漠,2003(6):43−48.

[5]　李森,颜长珍,宋翔,等. 近 30 a 龙羊峡水库周边地区沙漠化遥感监测[J]. 中国沙漠,2011(4):836−841.

[6]　谢家丽,颜长珍,李森,等. 近 35 a 内蒙古阿拉善盟绿洲化过程遥感分析[J]. 中国沙漠,2012(4):1142−1147.

[7]　常学礼,赵学勇,韩珍喜,等. 科尔沁沙地自然与人为因素对沙漠化影响的累加效应分析[J]. 中国沙漠,2005(4):466−471.

[8]　朱震达,王涛. 从若干典型地区的研究对近十余年来中国土地沙漠化演变趋势的分析[J]. 地理学报,1990(4):430−440.

[9]　乌云娜,裴浩,白美兰. 内蒙古土地沙漠化与气候变化和人类活动[J]. 中国沙漠,2002(3):91−96.

[10]　许端阳,康相武,刘志丽,等. 气候变化和人类活动在鄂尔多斯地区沙漠化过程中的相对作用研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2009(4):516−528.

[11]　罗君,许端阳,任红艳. 2000—2010 年鄂尔多斯地区沙漠化动态及其气候变化和人类活动驱动影响的辨识[J]. 冰川冻土,2013(1):48−56.

[12]　Yan C Z,Wang T,Song X,et al. Temporal and spatial changes

in the pattern of sandy desert and sandy land in northern China from 1975 to 2010 based on an analysis of Landsat images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(12): 3551－3563.

[13] Xu D, Song A, Tong H, et al. A spatial system dynamic model for regional desertification simulation－a case study of Ordos, China[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 83(C): 179－192.

[14] 胡梦珺，潘宁惠，李向锋，等. 1964－2014 年玛曲高原土地沙漠化驱动力定量分析[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：250－256.

[15] 董玉祥. 我国半干旱地区现代沙漠化驱动因素的定量辩识[J]. 中国沙漠，2001(4)：97－102.

[16] 常学礼，高玉葆. 区域沙漠化研究中的沙漠化数量表征[J]. 中国沙漠，2003(2)：8－12.

[17] 林培松，李森，李保生，等. 近 20a 来海南岛西部土地沙漠化与气候变化关联度研究[J]. 中国沙漠，2005(1)：29－34.

[18] 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(7)：917－928.

[19] 包慧娟，姚云峰，张学林，等. 科尔沁沙地景观格局变化的研究[J]. 干旱区资源与环境，2003(2)：83－88.

[20] 薛娴，王涛，吴薇，等. 中国北方农牧交错区沙漠化发展过程及其成因分析[J]. 中国沙漠，2005(3)：320－328.

[21] 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(6)：1017－1021.

[22] 张希彪，张多勇，上官周平，等. 1949－2013 年甘肃省环县土地沙漠化驱动因素研究[J]. 干旱区资源与环境，2016 (1)：130－135.

[23] 刘树林，王涛，屈建军，等. 中国北方草原沙漠化发展过程及其成因分析——以内蒙古苏尼特左旗为例[J]. 中国沙漠，2009(2)：206－211.

[24] 李博. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究[M]. 北京：科学出版社，1990.

[25] 史培军. 地理环境演变研究的理论与实践[M]. 北京：科学出版社，1991.

[26] 马永欢，周立华，樊胜岳，等. 中国土地沙漠化的逆转与生态治理政策的战略转变[J]. 中国软科学，2006(6)：53－59.

[27] 段翰晨，王涛，薛娴，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(2)：470－477.

[28] 内蒙古统计局. 1966－2015 年内蒙古统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社.

[29] 杨庆，李明星，郑子彦，等. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性[J]. 中国科学：地球科学，2017(3)：337－353.

[30] 郝成元，吴绍洪，杨勤业. 毛乌素地区沙漠化与土地利用研究[J]. 中国沙漠，2005(1)：35－41.

[31] 董光荣，申建友，金炯. 试论全球气候变化与沙漠化的关系[J]. 第四纪研究，1990(1)：91－98.

[32] Li S, Wang T, Yan C. Assessing the role of policies on land-use/cover change from 1965 to 2015 in the Mu Us Sandy Land, Northern China[J]. Sustainability, 2017, 9(7): 1164.

[33] 徐小玲，延军平. 毛乌素沙地的气候对全球气候变化的响应研究[J]. 干旱区资源与环境，2004(1)：135－139.

[34] 胡永宁，王林和，张国盛，等. 毛乌素沙地 1969—2009 年主要气候因子时间序列小波分析[J]. 中国沙漠，2013(2)：390－395.

[35] 王鹏涛，延军平，蒋冲，等. 三北防护林工程区气候变化分析[J]. 水土保持通报，2014(1)：273－278.

Spatial-temporal Evolution of Aeolian Desertification Process in Ordos City during 1975－2015

Feng Kun[1,2], Yan Changzhen[1], Xie Jiali[1], Qian Dawen[1,2]

(1.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Ordos City is located in the semi-arid region and also an ecotone from temperate steppe to desert steppe, and it suffers the serious aeolian desertification problems like the other parts of Northern China. Due to its representative and typical characteristics of the development and reversal process of aeolian desertification and its driving factors, Ordos City has become one of the hot areas of desertification research. We derives the spatial and temporal patterns change information of aeolian desertification from 1975 to 2015 based on the Landsat images, and analyzed the driving factors with the principal component analysis (PCA) and meteorological and social-economic data. The results showed that in the context of the fragile ecological environment, the development of aeolian desertification in Ordos City in the forty years was mainly influenced by human factors, such as population increase, reclamation and overgrazing. The trend of land desertification and the dominant driving factors are different at different periods: The land desertification tended to deteriorate from 1975 to 2000, and the main driving factors were human activities, followed by natural factors; The land desertification was reversed in 2000－2015, and the natural factors played more important role than human activity in this period.

Key words: aeolian desertification; driving factor; principal component analysis; Ordos