

2000—2015 年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力研究

王晓峰^{1, 2*}, 张明明¹, 尹礼唱¹, 黄鹏程³, 勒斯木初¹, 周潮伟¹

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省土地工程重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070

摘要: 中国干旱半干旱地区是连接中国与丝绸之路经济带沿线国家的重要纽带, 严峻的土地沙漠化形势制约其可持续发展。研究沙漠化进程及驱动机制对防治沙漠化具有重要意义。基于 2000 年和 2015 年两期中国北方沙漠化土地、气象数据、人口、GDP、DEM、土壤类型数据, 运用地理探测器方法研究了中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力。结果表明, (1) 2000—2015 年, 沙漠化面积减少了 97 700 km², 其中轻度、极重度沙漠化面积分别减少了 62 000 km² 和 130 600 km², 而中度和重度沙漠化面积分别增加了 21 500 km² 和 73 400 km²。整体上, 沙漠化逆转面积为 386 300 km², 其中明显逆转 239 000 km², 不明显逆转 147 300 km², 而沙漠化发展面积为 421 800 km², 其中明显发展 142 200 km², 不明显发展 279 600 km²。(2) 2000—2015 年, 沙漠化进程是自然和人为因素共同作用的结果, 但以自然因素为主要驱动力, 其中沙漠化对气候因素响应尤为敏感, 而降水量对沙漠化进程影响最大, 平均相对湿度的影响次之。(3) 气候因素间的交互作用对沙漠化进程影响显著, 而平均相对湿度、降水量、日照时数与其他气候因素的交互作用更明显。

关键词: 中国干旱半干旱地区; 沙漠化进程; 驱动力; 地理探测器

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.05.011

中图分类号: P941.71; X144

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2019) 05-0948-10

引用格式: 王晓峰, 张明明, 尹礼唱, 黄鹏程, 勒斯木初, 周潮伟, 2019. 2000—2015 年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力研究[J]. 生态环境学报, 28(5): 948-957.

WANG Xiaofeng, ZHANG Mingming, YIN Lichang, HUANG Pengcheng, LESI Muchu, ZHOU Chaowei, 2019. Study on the driving factors in desertification process in arid and semi-arid region of China from 2000 to 2015 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(5): 948-957.

中国是全世界受沙漠化危害严重的国家之一(王涛等, 2001), 2015 年国家林业局公布的《中国荒漠化和沙化状况公报》显示, 中国沙漠化防治形势依然十分严峻。沙漠化进程具有复杂性, 并且影响着人地耦合系统的可持续发展, 其驱动力研究一直是国内外学者关注热点。研究表明, 埃及 El-Dakhla 绿洲沙漠化主要受气候因素的影响(Ismael, 2015); 墨西哥中部半干旱高地沙漠化进程受人类活动主导(Becerril et al., 2015); 而蒙古 Hognokhaan、印度 Dharmapuri 地区沙漠化受气候因素和人类活动共同影响(Lamchin et al., 2017; Shoba et al., 2016)。中国干旱半干旱地区是连接中国与丝绸之路经济带沿线国家的重要枢纽, 风蚀沙化、土地盐碱化等问题突出(李春梅等, 2002), 在该区域及周边地区已开展了大量沙漠化驱动力研究。结果表明, 科尔沁沙地、呼伦贝尔沙地沙漠

化进程主要受气候变化的影响(王永芳等, 2016; 李姣等, 2017), 亚洲干旱区东部和西部、三北防护林工程区沙漠化也对气候变化的响应敏锐(Wang et al., 2017a; 黄麟等, 2018); 黑河流域、青海刚察县沙漠化受人为因素主导(刘蔚等, 2008; 田丽慧等, 2013), 近年来玛曲高原沙漠化逆转主要也是人为因素所致(胡梦珺等, 2016); 而黄河源地区、毛乌素沙地沙漠化受自然因素和人类活动共同影响(胡光印等, 2011; Liang et al., 2016)。沙漠化驱动力有明显的时空差异, 目前在中小尺度已有较好的突破, 但在更大尺度的定量评估相对较少, 并且已有定量研究主要采用传统的相关性(Wang et al., 2017a)和主成分分析(胡梦珺等, 2016)等方法, 其驱动机制有待进一步探析。

地理探测器是空间分异性探测及驱动力分析的重要方法(Wang et al., 2016a)。该方法无过多

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0507300); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA2002040201); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STS-ZDTP-036); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM4016); 国家留学基金委青年骨干教师出国研修项目(201806565025)

作者简介: 王晓峰(1977年生), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态遥感及建模方面的教学与科研。E-mail: wangxf@chd.edu.cn

*通信作者

收稿日期: 2019-01-07

假设条件制约，克服了传统统计方法处理类别变量的不足（湛东升等，2015）。相比传统的相关性和主成分分析，地理探测器充分挖掘了地理要素同其驱动因素之间的关联信息，它不仅可以分析各个驱动因素对地理要素的解释力，而且能够揭示驱动因素两两之间的交互作用对该地理要素的影响。地理探测器早期被应用于疾病影响因子评估方面（Wang et al., 2010），近年逐渐被应用于社会、生态环境等领域（Xu et al., 2018; Shrestha et al., 2017）。Liang et al.（2016）和 Du et al.（2016）利用地理探测器研究了毛乌素沙地和晋北生态脆弱山区沙漠化的驱动力，参考其研究，在前期用 MODIS 合成产品提取中国北方 2000 年、2015 年两期沙漠化土地的工作基础上（Wang et al., 2017b），以气象数据、人口、GDP、DEM、土壤类型为基本资料，利用地理探测器方法，对 2000—2015 年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动因素进行定量分析，揭示大尺度上沙漠化进程的驱动力，为丝绸之路经济带沿线地区防沙治沙、建设丝绸之路经济带生态屏障提供重要参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

中国干旱半干旱地区位于 36°44'—49°57'N，73°26'—123°55'E，面积约 243 万平方千米，主要包括大兴安岭以西，昆仑山—阿尔金山—祁连山和长城一线以北的广大地区（李飞等，2011）。区内大部分地区属于温带大陆性气候，降水量稀少，植被

覆盖低，沙漠、裸地、盐碱地等广布。中国八大沙漠和四大沙地皆分布于此，沙漠化问题突出。为了保证行政区划的完整性，本研究选取中国干旱半干旱地区所覆盖的西北六省区为研究区，包括新疆、青海、甘肃、陕西、宁夏、内蒙古（图 1）。

1.2 数据来源及数据处理

本研究沙漠化数据来源于前期成果（Wang et al., 2017b），该数据为基于 MODIS 合成产品、利用决策树提取的 2000 年和 2015 年的中国北方沙漠化土地，其 Kappa 系数为 0.856，分类精度良好，结果准确可靠，满足本研究应用精度。参考前人有关中国北方地区沙漠化驱动力的研究成果（表 1），本研究选取气象数据、人口、GDP、坡度、坡向和土壤类型为沙漠化进程的驱动因素。

本研究气象数据来源于中国气象科学数据共

表 1 沙漠化进程驱动因素选取参考
Table 1 Reference of driving factors in desertification process

Driving factor	Reference	Driving factor	Reference
SH	Yan et al., 2012	P	Li et al., 2014
MTmax	Hu et al., 2016	POP	Hu et al., 2016
MTmin	Hu et al., 2016	GDP	Bai et al., 2016
MT	Dong, 2001	S	Duan et al., 2018
MWS	Tian et al., 2013	A	Wang et al., 2017b
MRH	Li et al., 2014	ST	Sun et al., 2015

SH, MTmax, MTmin, MT, MWS, MRH, P, POP, S, A and ST in the Table 1 is abbreviation of sunshine hours, mean maximum temperature, mean minimum temperature, mean temperature, mean wind speed, mean relative humidity, precipitation, population, slope, aspect and soil type, respectively. The same below

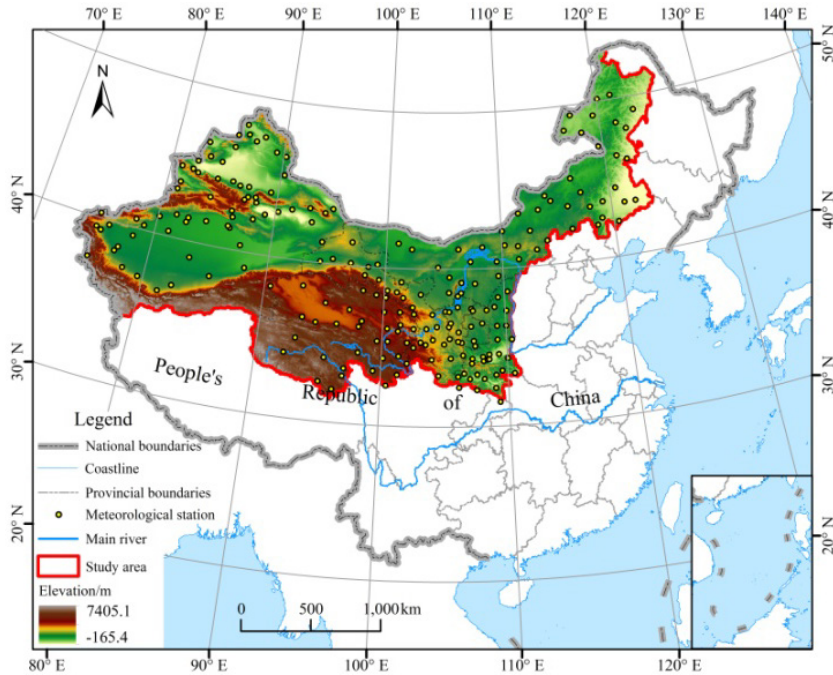


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Map of study area

享服务网 (<http://data.cma.cn/>), 包括 2000—2015 年研究区 222 个站点的日照时数、平均最高气温、平均最低气温、平均气温、平均风速、平均相对湿度和年降水量。为保证数据的完整性, 个别缺测数据选用相邻两年的平均值替代。人口、GDP 和土壤数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 包括 2000—2015 年的人口公里网格数据, 2000 年、2005 年、2010 年的 GDP 公里网格数据和土壤类型, 其分辨率均为 1 km。坡度和坡向利用 1 km 分辨率 DEM 提取。

为研究气候因素对沙漠化进程的影响, 选用专用于气象数据空间插值的 ANUSPLIN 软件对气象数据进行空间插值处理 (刘志红等, 2008)。自然因素和人类活动对沙漠化地区生态系统的影响具有滞后性 (陈秋红等, 2008), 长期数据能更好揭示地区的沙漠化驱动机制。因此, 本研究计算了 2000—2015 年的气象插值数据、人口的平均值作为 2000—2015 年影响沙漠化进程的气候、人口因素。2015 年 GDP 公里网格数据缺失, 参考官方公布的中国历年 GDP 增长率, 利用 2010 年公里网格数据推算出 2015 年 GDP, 并以 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 GDP 的平均值作为 2000—2015 年影响沙漠化进程的 GDP 因素。

1.3 研究方法

1.3.1 沙漠化变化率

图谱分析法已成为研究沙漠化的一种重要方法 (康文平等, 2016)。本文首先对解译的沙漠化程度数据进行编码 (表 2)。

表 2 沙漠化程度编码

Table 2 Coding of degree of desertification

Code	1	2	3	4	5
Desertification degree	Non	Mild	Moderate	Severe	Extremely severe

然后, 计算终止年份与起始年份的沙漠化程度编码差值。计算公式如下:

$$S_{ij}=S_j-S_i \quad (1)$$

式中, S_{ij} 表示 $i-j$ 年份的沙漠化程度编码差值; S_i 、 S_j 分别表示 i 、 j 年份沙漠化程度编码。

为定量研究沙漠化进程的驱动力, 需对沙漠化动态变化进行数量化描述。根据相关研究 (康文平等, 2016; Liang et al., 2016), 本研究以沙漠化变化率 (Desertification Change Ratio) 对沙漠化动态变化进行量化表示。由于沙漠化数据分辨率为 1 km, 最终确定用 10 km×10 km 方格对沙漠化程度编码差值进行运算, 得到每个方格的沙漠化变化率。每个方格为一个样本, 其沙漠化变化率计算公式如下。

$$DCR = \frac{\sum_{s=-4}^4 s \times N_s}{S_{\max} \times N_{\text{sum}}} = \frac{\sum_{s=-4}^4 s \times N_s}{4 \times 100} \quad (2)$$

式中, DCR 表示该方格的沙漠化变化率; s 表示该方格内的沙漠化程度编码差值; N_s 表示该方格沙漠化程度编码差值为 s 的象元个数; $S_{\max}$ 为沙漠化程度编码差值的最大值, 其为定值 4; N_{sum} 为该方格的象元总个数, 其为定值 100。

1.3.2 地理探测器

地理探测器包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测 4 个模块 (王劲峰等, 2017), 其模型定义为:

$$q_{D,DCR} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m N_{D_i} \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中, $q_{D,DCR}$ 表示驱动因素 D 对沙漠化变化率 (DCR) 的解释力, 即驱动因素 D 对沙漠化进程的影响程度; N 和 σ^2 分别表示研究区样本总数 (10 km×10 km 方格数) 和沙漠化变化率的方差, 本研究 N 为 21 559; i 表示驱动因素 D 划分的类/组; N_{D_i} 和 σ_i^2 分别表示驱动因素 D 中 i 类的样本数和沙漠化变化率方差; m 是驱动因素 D 的分类/组总数。 $q_{D,DCR} \in [0, 1]$, $q_{D,DCR}$ 越大说明驱动因素 D 对沙漠化进程的影响程度越大, 反之则越小; $q_{D,DCR}=1$ 表示驱动因素 D 完全决定了沙漠化进程, $q_{D,DCR}=0$ 表示驱动因素 D 和沙漠化进程没有关联。

风险探测器运用 t 统计量检验子区域间沙漠化变化率的均值是否存在明显差异; 因子探测器用于分析驱动因素对沙漠化变化率的解释力; 基于 F 统计量检验的生态探测器用于比较 D_1 和 D_2 驱动因素对沙漠化进程的影响是否存在显著差异; 交互探测器用于分析驱动因素之间的交互作用, 即两个驱动因素共同作用时是否会减弱或增强其对沙漠化进程的解释力, 或两个驱动因素对沙漠化进程的影响相互独立, 判据公式为:

非线性减弱:

$$q_{D_1 \cap D_2, DCR} < \min(q_{D_1, DCR}, q_{D_2, DCR}) \quad (4)$$

单因子非线性减弱:

$$\min(q_{D_1, DCR}, q_{D_2, DCR}) < q_{D_1 \cap D_2, DCR} < \max(q_{D_1, DCR}, q_{D_2, DCR}) \quad (5)$$

双因子增强:

$$q_{D_1 \cap D_2, DCR} > \max(q_{D_1, DCR}, q_{D_2, DCR}) \quad (6)$$

独立：

$$q_{D_1 \cap D_2, DCR} = q_{D_1, DCR} + q_{D_2, DCR} \quad (7)$$

非线性增强：

$$q_{D_1 \cap D_2, DCR} > q_{D_1, DCR} + q_{D_2, DCR} \quad (8)$$

式中， $\cap$ 是 D_1 和 D_2 驱动因素的叠加运算。

地理探测器适用于自变量（驱动因素）为类型量、因变量为数值量的情况（王劲峰等，2017）。本研究中的沙漠化数据为类型量，而驱动因素中气象数据、人口、GDP、坡度为数值量，故需将沙漠化数据转化为能反映沙漠化动态变化的数值量，而将气象数据、人口、GDP、坡度因素离散化为类型量。基于两期沙漠化土地，利用图谱分析法计算 2000—2015 年的沙漠化程度编码差值，进而利用沙漠化变化率计算得到反映沙漠化动态变化的数值量。对连续型的气象插值数据、人口、GDP 和坡度运用非监督分类方法将其离散化为类型量，并根据相关标准对坡向和土壤类型进行分类/组处理。

结合相关研究（Cao et al., 2013；李俊刚等，2016），本研究选用等距离法（EI）、几何间隔法（GI）、自然断点法（NB）、百分位数值法（QU）、标准差法（SD）对气象数据、人口、GDP 和坡度进行离散化，由于样本总量充足，故选用前 4 种方法将驱动因素分为 4—20 组，SD 方法使用 1、1/2、1/3、1/4 倍标准差进行分组，并运用地理探测器计算分类的驱动因素对沙漠化变化率的解释力，选取解释力最大的分组作为驱动因素的最佳离散化法。随着驱动因素分类数目的增多，驱动因素对沙漠化进程的解釋力逐渐趋于稳定（图 2）。当驱动因素的分类/组数目增加到 20 以上时，驱动因素对沙漠化变化率的解释力可能进一步提高，即分析结果会进一步改善，但解释力的改进程度极小，故目前分类

/组已能满足分析精度。对于日照时数、平均最低气温、平均风速，解释力最大的是 GI，分 20 类；对于人口、GDP，解释力最大的是 GI，分 4 类；对于平均相对湿度、坡度，解释力最大的是 QU，分 18 类；对于平均最高气温、平均气温、降水量，解释力最大的分别是 NB、SD、GI，分别分 17 类、18 类（1/3 倍标准差）、19 类。

根据土纲将土壤类型分为 12 组，分别是淋溶土、半淋溶土、钙层土、干旱土、漠土、初育土、半水成土、水成土、盐碱土、人为土、高山土和其他类型土。其中，土纲代码在 20 以上的区域范围小，故将其合为其他类型土，该土壤主要为西北盐壳。坡向按照 ArcGIS 坡向分类原理，分为平地、北、东北、东、东南、南、西南、西、西北 9 类。分组的气象数据、人口、GDP、坡度、坡向、土壤类型如图 3 所示。

2 结果与分析

2.1 2000—2015 年沙漠化变化动态

基于中国北方两期沙漠化土地，利用图谱分析法计算沙漠化程度编码差值，进而计算得到沙漠化变化率（图 4）。2000 年，沙漠化面积为 $157.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中轻度、中度、重度、极重度沙漠化面积分别为 37.78×10^4 、 14.85×10^4 、 11.66×10^4 、 $92.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；2015 年，沙漠化面积为 $147.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中轻度、中度、重度、极重度沙漠化面积分别为 31.58×10^4 、 17.00×10^4 、 19.00×10^4 、 $79.82 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2000—2015 年，沙漠化面积减少了 $9.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中轻度、极重度沙漠化面积分别减少了 6.20×10^4 和 $13.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，而中度和重度沙漠化面积分别增加了 $2.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $7.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。整体上，2000—2015 年，沙漠化动态变化面积为 $80.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。沙漠化逆转面积为 $38.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中沙漠化

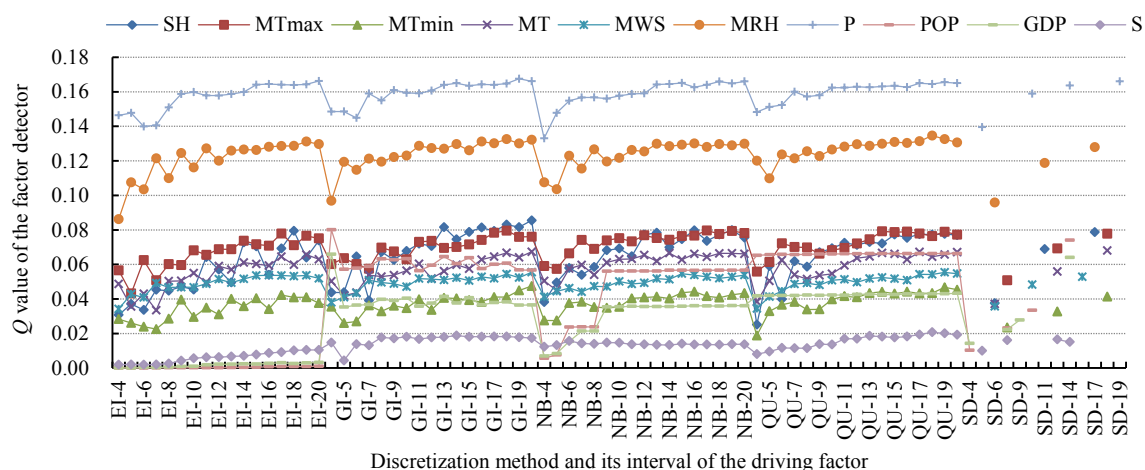


图 2 不同分类情况下驱动因素对沙漠化变化率的解释力 Q

Fig. 2 Q value of driving factors classified in different discretization method to DCR

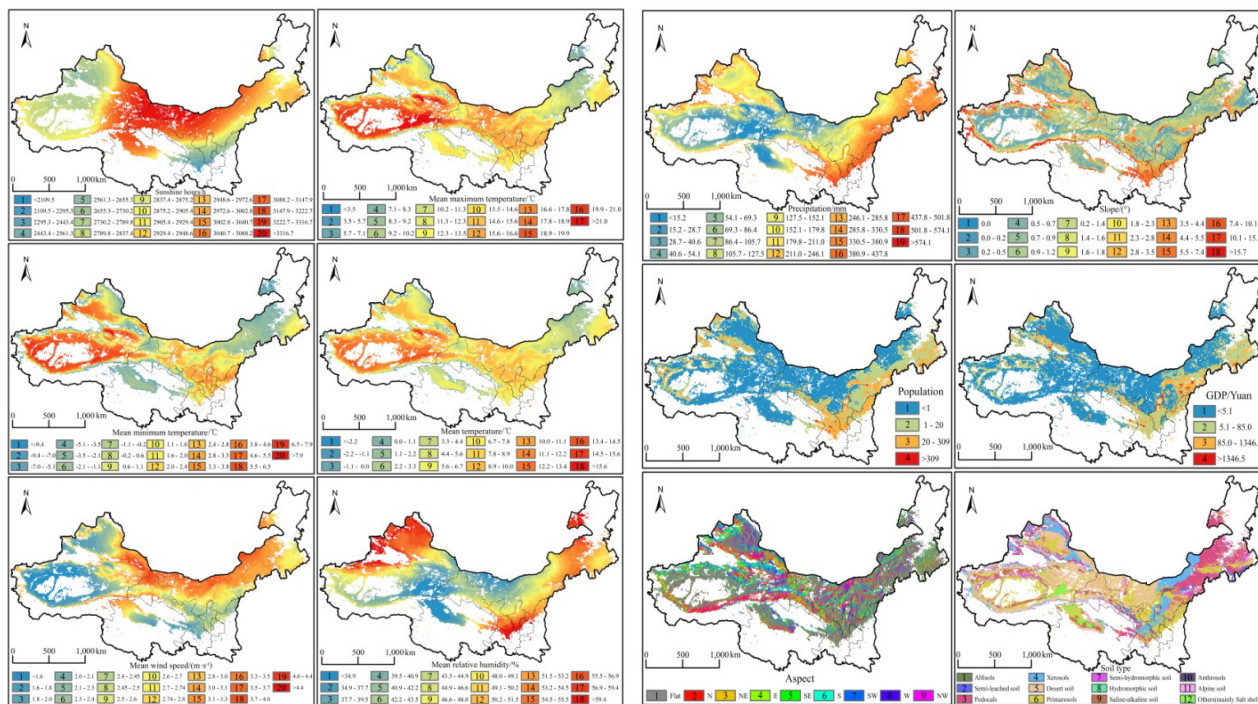


图3 驱动因素最佳离散化分类/组结果

Fig. 3 Driving factors classified by the best discretization method

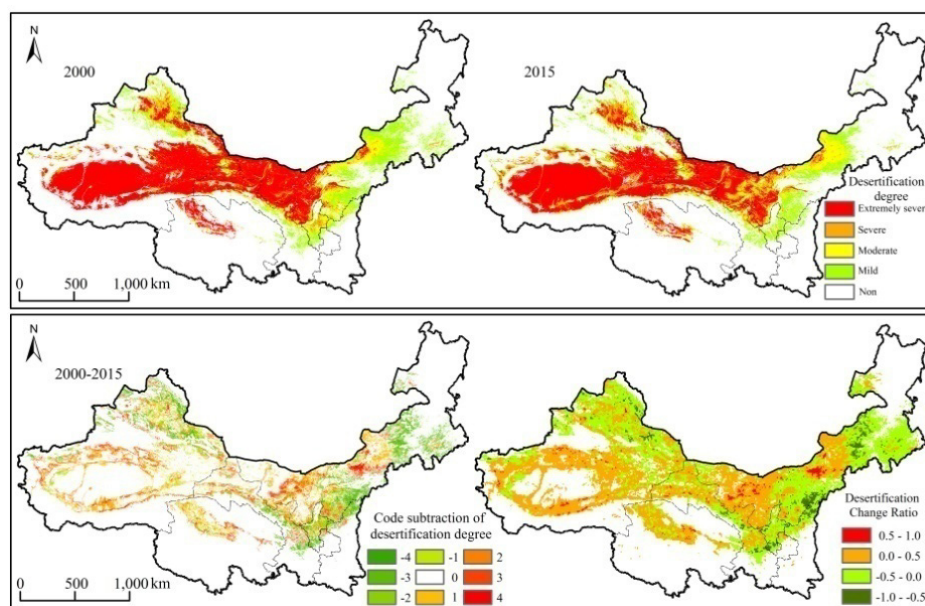


图4 沙漠化空间分布及其变化

Fig. 4 Spatial distribution and change of desertification

明显逆转(沙漠化程度编码差值为-4和-3)面积为 $23.90 \times 10^4 \text{ km}^2$, 不明显逆转(编码差值为-2和-1)面积为 $14.73 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。沙漠化发展面积为 $42.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 $14.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ 区域沙漠化明显发展(编码差值为3和4), $27.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ 区域沙漠化不明显发展(编码差值为1和2)。

2000—2015年,塔克拉玛干沙漠南部和北部边缘、柴达木盆地东部、巴丹吉林沙漠、阴山北麓-

浑善达克沙地生态功能保护区西南部等地区沙漠化明显发展(沙漠化变化率大于0.5),毛乌素沙地西南和东北部、浑善达克沙地东部及东北部等地区沙漠化明显逆转(变化率小于-0.5)。

2.2 2000—2015年沙漠化进程驱动力分析

风险探测器分析结果(图5)表明:2000—2015年,在中国干旱半干旱地区,随着日照时数的增大,沙漠化有所发展,但过低的日照时数也会加速沙漠

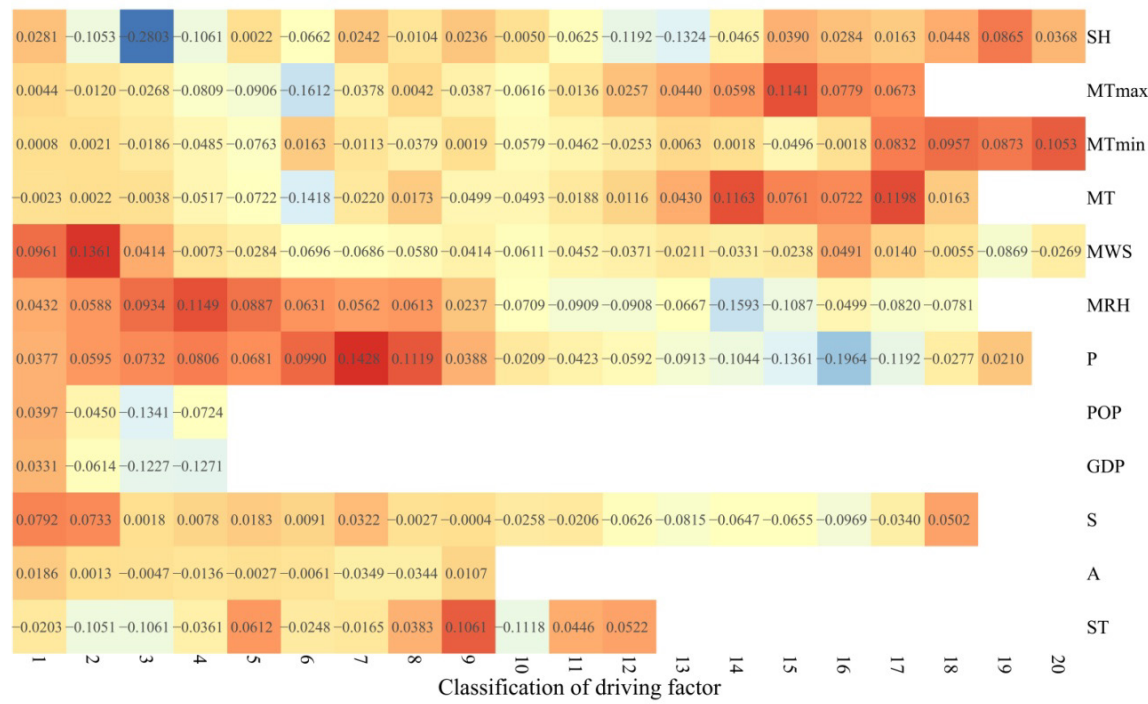


图 5 风险探测器分析结果（平均沙漠化变化率）
Fig. 5 Result of the risk detector (average DCR)

化，这可能与过低的日照影响沙区植被恢复与生长有关（曹永强等，2018）。随着气温升高，沙漠化明显发展。研究区平均风速小的地区反而沙漠化明显发展，这可能与大风日数有关（董玉祥，2001），或与过小的风速不利于植被生长有关（Wang et al., 2017a），或与该地区沙漠化受气温、降水等因素主导有关（Wang et al., 2016b）。随着降水量和平均相对湿度的增大，沙漠化程度大幅度逆转，但过高的降水量也会加速沙漠化，这可能与过高的降水量会加剧地区土壤侵蚀有关。人口多和 GDP 高的地区沙漠化明显改善，这与沙漠化防治的人力与经济投入有关。坡度过低或过高的地区沙漠化加速，这与相关研究结果具有一致性（段翰晨等，2018）。缓坡地区沙漠化的发展可能与缓坡有利于风沙侵蚀物的搬运有关，而陡坡地区沙漠化的发展可能与风蚀物不易沉降有关。坡向对沙漠化进程的影响极小，平地、西北、正北坡向的地区呈沙漠化发展，其他地区沙漠化有不同程度改善。平地上沙漠化发展可能与平地更易于风沙侵蚀物的搬运有关，而西北、正北坡向沙漠化发展可能与研究区长期盛行西北风有关。盐碱土、漠土、其他类型土（主要为西北盐壳）、高山土、水成土地区呈沙漠化发展，其中盐碱土、漠土、其他类型土地区沙漠化发展明显，其平均沙漠化变化率分别为 0.106 1、0.061 2、0.052 2。人为土、钙层土、半淋溶土地区沙漠化明显逆转，其平均沙漠化变化率分别为-0.111 8、

-0.106 1、-0.105 1，其中人为土地区沙漠化明显逆转可能与退耕还林还草政策有关。

因子探测器的 q 值(表 3)为:降水量(0.167 6)>平均相对湿度(0.134 7)>日照时数(0.085 5)>土壤类型(0.081 7)>人口(0.080 1)>平均最高气温(0.079 7)>平均气温(0.068 1)>GDP(0.065 9)>平均风速(0.055 5)>平均最低气温(0.047 5)>坡度(0.020 7)>坡向(0.004 1)。因此，2000—2015 年，降水量是影响沙漠化进程的首要因素，其对沙漠化变化率的解释力为 16.76%。同时，平均相对湿度和日照时数对沙漠化进程也有重要影响，仅次于降水量。土壤类型对沙漠化变化率的解释力为 8.17%，其对沙漠化进程的影响也不容忽视。社会经济因素中，人口对沙漠化进程的影响大于 GDP。平均最高气温对沙漠化变化率的解释力略微大于平均气温，说明极端高温对沙漠化进程的影响更明显。平均最高气温、平均气温对沙漠化进程的影响略大于平均风速、平均最低气温，而平均风速对沙漠化进程的影响略大于平均最低气温。地形因素中，坡向对沙漠化进程的影响极小。

表 3 因子探测器分析结果
Table 3 Result of the factor detector

Driving factor	SH	MTmax	MTmin	MT	MWS	MRH
q value	0.085 5	0.079 7	0.047 5	0.068 1	0.055 5	0.134 7
Driving factor	P	POP	GDP	S	A	ST
Q value	0.167 6	0.080 1	0.065 9	0.020 7	0.004 1	0.081 7

2000—2015 年,平均相对湿度、降水量和其他气候因素对沙漠化进程的影响有明显差异(表 4)。任意两个驱动因素的交互作用都是增强型(图 6),即任意两个因素的交互作用对沙漠化进程的影响都大于单个因素。其中,日照时数和人口、日照时数和 GDP、平均最高气温和平均气温、平均相对湿度和降水量、平均相对湿度和人口、平均相对湿度和 GDP、平均相对湿度和土壤类型、降水量和人口、降水量和 GDP、降水量和土壤类型、人口和 GDP、

人口和坡度、人口和土壤类型、GDP 和坡度、GDP 和土壤类型、坡度和土壤类型呈双因子增强的交互作用,其他驱动因素均呈非线性增强的交互作用。

气候因素之间的交互作用对沙漠化进程的影响显著,其中平均相对湿度、降水量、日照时数与其他气候因素的交互作用对沙漠化进程的影响更明显,即平均相对湿度、降水量、日照时数和其他气候因素共同作用时,其共同作用对沙漠化变化率的解释力大幅度提高。

3 讨论与结论

3.1 讨论

沙漠化驱动力具有明显的时空差异性。在小尺度上,2001—2015 年,呼伦贝尔沙地沙漠化主要驱动力为降水量的年际变化(李姣等,2017);2000—2013 年,科尔沁沙地沙漠化进程主要受水热因素的影响(王永芳等,2016);2000—2015 年,锡林郭勒盟地区沙漠化逆转主要驱动力为降水量的增多与国家政策的支持,而 2010 年以后沙漠化的发展为人类活动所主导(王艳琦等,2018);2000—2012 年,山西北部生态脆弱山区风蚀沙漠化主要驱动因素为土壤类型、降水量和风速,地质、气候因素对沙漠化进程的影响比人类活动大(Du et al., 2016);2000—2015 年,鄂尔多斯市沙漠化逆转驱动力以自然因素为主,而人为因素为辅(冯坤等,

表 4 生态探测器分析结果

Table 4 Result of the ecological detector

Driving factor	SH	MTmax	MTmin	MT	MWS	MRH	P	POP	GDP	S	A	ST
SH												
MTmax	N											
MTmin	N	N										
MT	N	N	Y									
MWS	N	N	N	N								
MRH	Y	Y	Y	Y	Y							
P	Y	Y	Y	Y	Y	Y						
POP	N	N	Y	N	Y	N	N					
GDP	N	N	Y	N	N	N	N	N				
S	N	N	N	N	N	N	N	N	N			
A	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N		
ST	N	N	Y	N	Y	N	N	N	N	Y	Y	

Y means that there is a significant difference between the effects of driving factors on desertification process with the confidence of 95%, and N means not

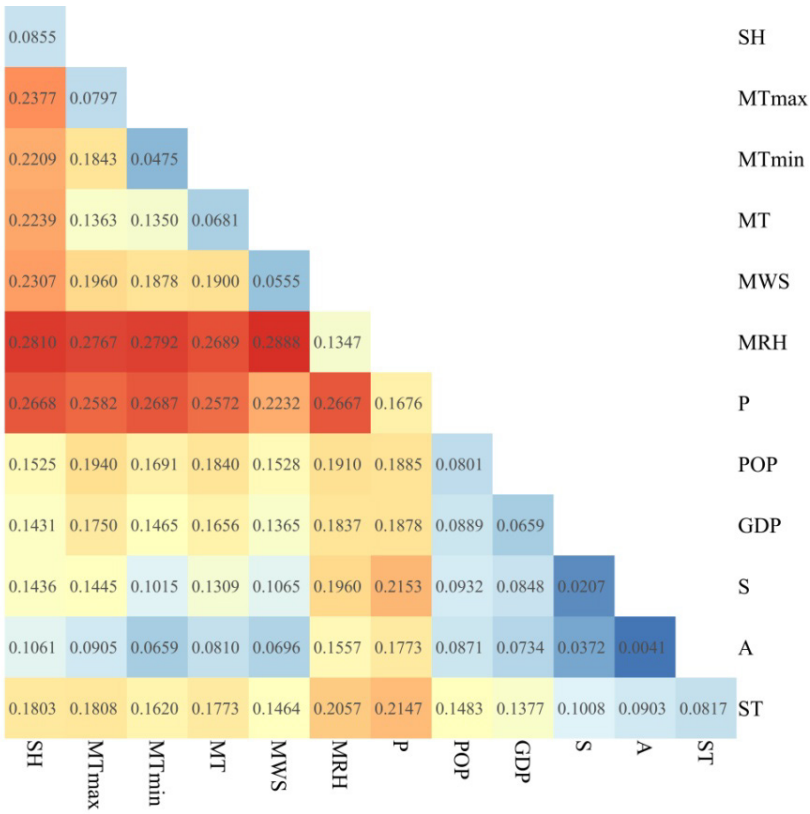


图 6 交互探测器分析结果

Fig. 6 Result of the interactive detector

2018); 毛乌素沙地东部沙漠化为人类活动所致, 而其西部地区沙漠化为自然因素所主导 (Liang et al., 2016)。在中等尺度上, 1964—2014 年, 玛曲高原沙漠化扩张是自然和人为因素共同作用的结果, 而 1998—2014 年沙漠化逆转主要受人为因素影响 (胡梦珩等, 2016); 1975—2015 年, 阿拉善高原影响沙漠化进程最主要的因素为人类活动, 同时气候变化也是另一重要因素 (万炜等, 2018)。在大尺度上, 2000—2015 年, “三北” 防护林等生态工程实施导致风速减弱等气候因素变化从而减少土壤风蚀量的贡献约 85% (黄麟等, 2018); 亚洲干旱区东部和西部沙漠化进程对气候变化的响应较为敏锐 (Wang et al., 2017a)。

本研究认为, 2000—2015 年, 中国干旱半干旱地区沙漠化进程受自然和人为因素共同作用, 但自然因素为沙漠化主要驱动力, 这与相关研究具有一致性 (冯坤等, 2018; Du et al., 2016)。中国干旱半干旱地区沙漠化对气候响应敏感, 这与 Wang et al. (2017a) 研究结果相吻合, 其中降水量影响最大, 这与相关研究具有一致性 (李姣等, 2017; 王艳琦等, 2018), 说明在分析大空间尺度驱动力方面地理探测器是一种科学有效的新方法。作为一种分析驱动因子的新统计学方法, 地理探测器不仅能探测驱动因素的解释力, 还能分析驱动因素的交互作用 (王劲峰等, 2017)。中国干旱半干旱地区沙漠化进程受到平均相对湿度、降水量、日照时数与其他气候因素的交互作用更明显。前期相关学者运用该方法分别研究了毛乌素沙地、晋北生态脆弱山区的沙漠化驱动力 (Liang et al., 2016; Du et al., 2016), 参考其研究, 本研究将该方法应用于中国干旱半干旱地区, 分析了大空间尺度上沙漠化进程驱动力, 可为沙漠化及其他地理要素的驱动力分析提供参考。此外, 参考相关研究 (康文平等, 2016; Liang et al., 2016), 本文提出了沙漠化变化率指数, 其对沙漠化研究有一定的参考意义。

政策、科技投入也会影响沙漠化进程 (张靖等, 2013; 宁宝英等, 2018)。由于数据的限制和区域尺度的制约, 本研究未能定量分析政策、科技等对沙漠化进程的影响, 但人口、GDP、土壤类型对沙漠化进程的影响一定程度上也反映了政策、科技等的重要影响。此外, 沙漠化对气候变化的响应具有空间差异性 (王永芳等, 2016)。由于方法的局限, 本研究未能分析沙漠化对气候因素响应的空间差异。本研究结果可为丝绸之路经济带沿线地区防沙治沙、建设丝绸之路经济带生态屏障提供重要参考。

3.2 结论

(1) 2000—2015 年, 沙漠化面积减少了 9.77×10^4

km^2 , 其中轻度、极重度沙漠化面积分别减少了 6.20×10^4 、 $13.06 \times 10^4 \text{ km}^2$, 而中度和重度沙漠化面积分别增加了 $2.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $7.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。整体上, 沙漠化逆转面积为 $38.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中沙漠化明显逆转面积为 $23.90 \times 10^4 \text{ km}^2$, 不明显逆转面积为 $14.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, 而沙漠化发展面积为 $42.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 $14.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ 区域沙漠化明显发展。

(2) 2000—2015 年, 沙漠化进程是自然和人为因素共同作用的结果, 但以自然因素为主要驱动力, 其中沙漠化对气候因素响应尤为敏感, 而降水量对沙漠化进程影响最大, 平均相对湿度的影响次之。整体上, 影响土地沙漠化的驱动力依次为气候因素、土壤类型、社会经济因素、地形因素。

(3) 任意驱动因素的交互作用对沙漠化进程的影响均大于单一驱动因素。气候因素之间的交互作用对沙漠化进程影响显著, 而平均相对湿度、降水量、日照时数与其他气候因素的交互作用更明显。

参考文献:

- BECERRIL-PINA R, MASTACHI-LOZA C A, GONZ LEZ-SOSA E, et al., 2015. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico [J]. *Journal of Arid Environments*, 120: 4-13.
- CAO F, GE Y, WANG J F, 2013. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 50(1): 78-92.
- DU Z Q, XU X M, ZHANG H, et al., 2016. Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk [J]. *PloS one*, 11(3): e0151331.
- ISMAEL H, 2015. Evaluation of present-day climate-induced desertification in El-Dakhla oasis, western desert of Egypt, based on integration of MEDALUS method, GIS And RS techniques [J]. *Present Environment and Sustainable Development*, 9(2): 47-72.
- LAMCHIN M, LEE W K, JEON S W, et al., 2017. Correlation between desertification and environmental variables using remote sensing techniques in Hognokhaan [J]. *Mongolia. Sustainability*, 9(4): 581.
- LIANG P, YANG X P, 2016. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) sandy land, northern China and their impact factors [J]. *Catena*, 145: 321-333.
- SHOBA P, RAMAKRISHNAN S, 2016. Modeling the contributing factors of desertification and evaluating their relationships to the soil degradation process through geomaticstechniques [J]. *Solid Earth*, 7(2): 341-354.
- SHRESTHA A, LUO W, 2017. Analysis of groundwater nitrate contamination in the central valley: comparison of the geodetector method, principal component analysis and geographically weighted regression [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(10): 297.
- WANG J F, ZHANG T L, FU B J, 2016a. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 67: 250-256.
- WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al., 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(1): 107-127.
- WANG X F, YIN L C, XIAO F Y, et al., 2017b. The desertification process in the silk road economic belt in the past 15 years: A study using

- MODIS data and GIS analysis [J]. *Geological Journal*, 53(S1): 322-331.
- WANG X M, HUA T, LANG L L, et al., 2017a. Spatial differences of aeolian desertification responses to climate in arid Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 148: 22-28.
- WANG X M, HUA T, MA W Y, 2016b. Responses of aeolian desertification to a range of climate scenarios in China [J]. *Solid Earth*, 7(3): 959-964.
- XU X, ZHAO Y, ZHANG X L, et al., 2018. Identifying the impacts of social, economic, and environmental factors on population aging in the Yangtze River delta using the geographical detector technique [J]. *Sustainability*, 10(5): 1528.
- 柏菊, 闫峰, 2016. 2001—2012年毛乌素沙地荒漠化过程及驱动力研究[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 39(1): 132-138.
- BAI J, YAN F, 2016. Process of desertification and its driving forces in the Mu Us sandy land in 2001—2012 [J]. *Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition)*, 39(1): 132-138.
- 曹永强, 张亮亮, 袁立婷, 2018. 辽宁省植被生长季 NDVI 对气候因子的响应[J]. *植物学报*, 53(1): 82-93.
- CAO Y Q, ZHANG L L, YUAN L T, 2018. Correlation analysis of normalized difference vegetation index (NDVI) and climatic factors in the vegetative growing season in Liaoning province [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 53(1): 82-93.
- 陈秋红, 周尧治, 辛晓平, 2008. 近 50 年来呼伦贝尔草原沙漠化主要影响因素的定量分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 18(5): 200-204.
- CHEN Q H, ZHOU Y Z, XIN X P, 2008. Quantitative study of main influential factors of sandy desertification in Hulunbeier grassland during the near fifty years [J]. *China Population, Resources and Environment*, 18(5): 200-204.
- 董玉祥, 2001. 我国半干旱地区现代沙漠化驱动因素的定量辨识[J]. *中国沙漠*, 21(4): 97-102.
- DONG Y X, 2001. Quantitative identification of driving factors of contemporary sandy desertification in semi-arid zone in China [J]. *Journal of Desert Research*, 21(4): 97-102.
- 段翰晨, 薛嫻, 2018. 基于 DEM 的科尔沁沙地沙漠化土地时空分布特征[J]. *干旱区资源与环境*, 32(8): 74-79.
- DUAN H C, XUE X, 2018. Spatio-temporal distribution of aeolian desertification in Horqin sandy land based on DEM [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 32(8): 74-79.
- 冯坤, 颜长珍, 谢家丽, 等, 2018. 1975—2015 年鄂尔多斯市沙漠化的时空演变过程[J]. *中国沙漠*, 38(2): 233-242.
- FENG K, YAN C Z, XIE J L, et al., 2018. Spatial-temporal evolution of aeolian desertification process in Ordos city during 1975—2015 [J]. *Journal of Desert Research*, 38(2): 233-242.
- 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等, 2011. 黄河源区 1975—2005 年沙漠化时空演变及其成因分析[J]. *中国沙漠*, 31(5): 1079-1086.
- HU G Y, DONG Z B, LU J F, et al., 2011. Spatial and temporal changes of desertification land and its influence factors in source region of the Yellow River from 1975 to 2005 [J]. *Journal of Desert Research*, 31(5): 1079-1086.
- 胡梦珺, 潘宁惠, 李向峰, 等, 2016. 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*, 36(4): 250-256.
- HU M J, PAN N H, LI X F, et al., 2016. Quantitative analysis of driving forces to land desertification in Maqu Plateau during 1964—2014 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 36(4): 250-256.
- 黄麟, 祝萍, 肖桐, 等, 2018. 近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应[J]. *地理科学*, 38(4): 600-609.
- HUANG L, ZHU P, XIAO T, et al., 2018. The sand fixation effects of Three-North shelter forest program in recent 35 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 38(4): 600-609.
- 康文平, 刘树林, 段翰晨, 2016. 基于 MODIS 时间序列数据的沙漠化遥感监测及沙漠化土地图谱分析: 以内蒙古中西部地区为例[J]. *中国沙漠*, 36(2): 307-318.
- KANG W P, LIU S L, DUAN H C, 2016. Monitoring and Spatial-temporal Changes Analysis of Aeolian Desertified Lands Based on MODIS Data: A case study on the middle-west part of Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Desert Research*, 36(2): 307-318.
- 李诚志, 张燕, 刘志辉, 等, 2014. 新疆地区沙漠化对气候变化的响应与治理对策[J]. *水土保持通报*, 34(4): 264-268.
- LI C Z, ZHANG Y, LIU Z H, et al., 2014. Response and control mechanism of desertification to climate change in Xinjiang region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 34(4): 264-268.
- 李春梅, 高素华, 2002. 我国北方干旱半干旱地区水资源演变规律及其供需状况评价[J]. *水土保持学报*, 16(2): 68-71.
- LI C M, GAO S H, 2002. Law of water resource evolvement and estimating of water supply and requirement in arid and semi-arid Region of north China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(2): 68-71.
- 李飞, 赵军, 赵传燕, 等, 2011. 中国干旱半干旱区潜在植被演替[J]. *生态学报*, 31(3): 689-697.
- LI F, ZHAO J, ZHAO C Y, et al., 2011. Succession of potential vegetation in arid and semi-arid area of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(3): 689-697.
- 李姣, 张春来, 李庆, 等, 2017. 近 15 年来呼伦贝尔沙地土地沙漠化发展及其驱动力[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 53(3): 323-328.
- LI J, ZHANG C L, LI Q, et al., 2017. Development of sandy desertification and driving forces in HulunBuir sandy land in the past 15 years [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 53(3): 323-328.
- 李俊刚, 闫庆武, 熊集兵, 等, 2016. 贵州省煤矿区植被指数变化及其影响因子分析[J]. *生态与农村环境学报*, 32(3): 374-378.
- LI J G, YAN Q W, XIONG J B, et al., 2016. Variation of Vegetation Index in Coal Mining Areas in Guizhou Province and Its Affecting Factors [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 32(3): 374-378.
- 刘蔚, 王涛, 郑航, 等, 2008. 黑河流域不同类型土地沙漠化驱动力分析[J]. *中国沙漠*, 28(4): 634-641.
- LIU W, WANG T, ZHENG H, et al., 2008. Driving forces of different type of land desertification in Heihe River basin [J]. *Journal of Desert Research*, 28(4): 634-641.
- 刘志红, MCVICAR T R, NIEL V, 等, 2008. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. *气象*, 34(2): 92-100.
- LIU Z H, MCVICAR T R, NIEL V, et al., 2008. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN [J]. *Meteorological Monthly*, 34(2): 92-100.
- 宁宝英, 马建霞, 姜志德, 等, 2018. 基于专利的中国沙漠化治理技术分析[J]. *中国沙漠*, 38(5): 989-998.
- NING B Y, MA J X, JIANG Z D, et al., 2018. Patent Analysis on desertification control technology in China [J]. *Journal of Desert Research*, 38(5): 989-998.
- 孙滨峰, 王效科, 2015. 新疆沙漠化敏感性评价研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 40(7): 108-112.
- SUN B F, WANG X K, 2015. On assessment of sandy desertification sensitivity in Xinjiang [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 40(7): 108-112.
- 田丽慧, 张登山, 胡梦珺, 等, 2013. 1976—2007 年青海省刚察县土地沙漠化驱动力分析[J]. *中国沙漠*, 33(2): 493-500.
- TIAN L H, ZHANG D S, HU M J, et al., 2013. Driving forces of land

- aeolian desertification in Gangcha county of Qinghai province, China, during 1976–2007 [J]. *Journal of Desert Research*, 33(2): 493–500.
- 万伟, 颜长珍, 肖生春, 等, 2018. 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*, 38(1): 17–29.
- WAN W, YAN C Z, XIAO S C, et al., 2018. Process, Spatial pattern and driving mechanisms of the aeolian desertification in the Alxa plateau from 1975 to 2015 [J]. *Journal of Desert Research*, 38(1): 17–29.
- 王劲峰, 徐成东, 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 72(1): 116–134.
- WANG J F, XU C D, 2017. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116–134.
- 王涛, 朱震达, 2001. 中国北方沙漠化的若干问题[J]. *第四纪研究*, 21(1): 56–65.
- WANG T, ZHU Z D, 2001. Some problems of desertification in northern China [J]. *Quaternary Sciences*, 21(1): 56–65.
- 王艳琦, 银山, 郭恩亮, 等, 2018. 基于 landsat-8 OLI 影像的沙漠化动态分析: 以锡林郭勒盟为例[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 39(5): 58–63.
- WANG Y Q, YIN S, GUO E L, et al., 2018. Desertification dynamic analysis based on landsat-8 OLI image: Take XilinGol League as an example [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 39(5): 58–63.
- 王永芳, 张继权, 马齐云, 等, 2016. 21 世纪初科尔沁沙地沙漠化对区域气候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 32(S2): 177–185.
- WANG Y F, ZHANG J Q, MA Q Y, et al., 2016. Response of aeolian desertification to regional climate change in Horqin sandy land at beginning of 21st century [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(S2): 177–185.
- 严应存, 校瑞香, 肖建设, 等, 2012. 青海省巴音河流域 LUCC 遥感调查及驱动分析[J]. *中国沙漠*, 32(1): 276–283.
- YAN Y C, XIAO R X, XIAO J S, et al., 2012. Remote sensing monitoring and driving factor analysis on land use and land cover changes of Bayin river basin in Qinghai province [J]. *Journal of Desert Research*, 32(1): 276–283.
- 湛东升, 张文忠, 余建辉, 等, 2015. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. *地理科学进展*, 34(8): 966–975.
- ZHAN D S, ZHANG W Z, YU J H, et al., 2015. Analysis of influencing mechanism of residents' livability satisfaction in Beijing using geographical detector [J]. *Progress in Geography*, 34(8): 966–975.
- 张靖, 牛建明, 同丽嘎, 等, 2013. 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*, 33(6): 1643–1653.
- ZHANG J, NIU J M, TONG L G, et al., 2013. 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*, 33(6): 1643–1653.

Study on the Driving Factors in Desertification Process in Arid and Semi-arid Region of China from 2000 to 2015

WANG Xiaofeng^{1, 2*}, ZHANG Mingming¹, YIN Lichang¹, HUANG Pengcheng³, LESI Muchu¹, ZHOU Chaowei¹

1. The School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of land engineering, Xi'an 710054, China;

3. The Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

Abstract: The arid and semi-arid region of China is an important bond connecting China and the countries along the Silk Road economic belt, but severe situation of land desertification restricts the sustainable development in the region. It is of great significance to study the process and driving mechanism of desertification in order to prevent and control desertification. On the basis of the desertification in the northern part of China in 2000 and 2015, meteorological data, population, GDP, DEM and soil types, the paper studied on the driving factors in desertification process in arid and semi-arid region of China by geographical detectors method. Results were as follows: (1) From 2000 to 2015, desertification decreased by 97 700 km². Slight desertification and extremely severe desertification decreased by 62 000 km² and 130 600 km², respectively. Besides, moderate desertification and severe desertification increased by 21 500 km² and 73 400 km², respectively. Generally, the area of desertification reversal was 386 300 km², and the area where desertification obviously reversed was 239 000 km², and the area where desertification slightly reversed was 147 300 km². The area of desertification development was 421 800 km², and the area where desertification evidently developed was 142 200 km², and the area where desertification slightly developed was 279 600 km². (2) From 2000 to 2015, desertification process was a comprehensive result that was pushed by physical factors and human activity, but main driving forces were physical factors. Desertification was particularly sensitive to climatic factors, and precipitation had a greatest impact on desertification processes, and mean relative humidity merely had a less effect than precipitation. And (3) the interaction among climatic factors had an evident effect on the desertification process, and the interaction between mean relative humidity, precipitation, sunshine hours and other climatic factors was greater obvious.

Key words: arid and semi-arid region of China; desertification process; driving factors; geographical detectors