

基于PSR框架的内蒙古自治区沙漠化敏感性评估

田璐^{1,2}, 邱思静¹, 彭建^{1,2*}, 胡熠娜¹, 贾靖雷^{1,2}, 毛祺¹

(1. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要:沙漠化敏感性是测度区域沙漠化可能性的关键指标。鉴于沙漠化敏感性研究“重评价、缺框架”、“重格局、轻变化”的研究现状, 本文基于“压力—状态—响应”(Pressure-State-Response, PSR)分析框架, 构建了“气候条件—地表覆盖—植被恢复”沙漠化敏感性综合评价指标体系, 定量评估了2000、2015年内蒙古自治区(除流动沙地(丘)外)沙漠化敏感性, 结合县域人口密度开展了区域沙漠化防治分区。研究结果表明: 2015年研究区以中度敏感区为主(27.04%), 其次为轻度敏感区(25.53%)、不敏感区(22.96%)和高度敏感区(20.82%), 极敏感区占比最小(3.65%), 沙漠化敏感性呈现出中西部高、东部低的空间格局; 2000-2015年间, 内蒙古自治区9.20%的土地沙漠化敏感性等级降低, 24.83%则趋于增强。研究区可划分为生态保育区、沙化治理区、综合发展区和生态移民区四大沙漠化防治区。

关键词:沙漠化敏感性; PSR框架; 防治分区; 内蒙古自治区

1 引言

沙漠化是发生于干旱、半干旱及部分半湿润地区, 由于人为过度活动所产生的一种以风沙活动为主要标志的土地退化过程(朱震达等, 1992), 也是当今世界面临的重大生态—社会—经济问题之一(UN, 1994; Lamchin et al, 2017)。沙漠化过程显著地制约区域生态与社会经济的可持续发展: 一方面, 沙漠化过程导致土壤养分流失, 土地生产力和生物生产量下降, 对区域生态安全构成巨大挑战; 另一方面, 沙漠化过程造成可利用土地资源减少, 导致人类生存和发展空间急剧缩减, 严重制约了社会经济的快速发展(朱震达, 1991)。作为世界上受沙漠化危害最为严重的国家之一, 截至2014年, 中国沙化土地面积达172.12万km², 超过国土总面积的1/6, 沙漠化防治工作被提升到建设美丽中国、改

善民生的国家战略高度。作为测度区域沙漠化发生可能性的重要指标, 沙漠化敏感性的定量评估可以为因地制宜的防治沙漠化提供针对性的科学依据。

沙漠化研究起源于1930年代的美国, 主要由于农业开发引起的土壤风蚀而受到学者的关注(王涛等, 2003)。1977年联合国召开世界沙漠化大会以后, 国内外沙漠化相关研究大量涌现, 主要研究内容包括: 土地沙漠化形成的背景与驱动力(刘彦随等, 2002; D'Odorico et al, 2013)、气候及土地利用方式变化对沙漠化的影响(Lavee et al, 1998; 薛娴等, 2005; 花婷等, 2014)、以实验与计算机建模技术为手段的沙漠化动力学过程研究(Landry et al, 1994; 郑晓静等, 2006)、沙漠化监测与评估(Diouf et al, 2001; 朱金峰等, 2010; Song et al, 2015)、基于恢复生态学沙漠化生物恢复机理(赵哈林等, 2007), 以及

收稿日期: 2017-09-19; 修订日期: 2018-10-11。

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201511001-01)[Foundation: Commonwealth Project of the Ministry of Land and Resources of China, No.201511001-01]。

作者简介: 田璐(1994-), 女, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 研究方向为综合自然地理和景观生态, E-mail: 18604236913@163.com。

通讯作者: 彭建(1976-), 男, 四川彭州人, 副教授, 主要从事综合自然地理学、景观生态与土地利用、生态系统综合评估研究, E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn。

引用格式: 田璐, 邱思静, 彭建, 等. 2018. 基于PSR框架的内蒙古自治区沙漠化敏感性评估[J]. 地理科学进展, 37(12): 1682-1692. [Tian L, Qiu S J, Peng J, et al. 2018. Desertification sensitivity evaluation in Inner Mongolia Autonomous Region based on PSR framework[J]. Progress in Geography, 37(12): 1682-1692.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.12.010

沙漠化防治研究(陈玉福等, 2003; 韩致文等, 2004; 常学礼等, 2009)等。1990年代以来, 沙漠化敏感性评价的相关研究逐渐展开(Rubio et al, 1998), 并以欧盟资助的地中海沙漠化与土地利用研究项目开发的环境敏感区(Environmental Sensitivity Area, ESA)方法为代表。该方法以气候、土壤质量、植被覆盖和土地管理等影响沙漠化的关键因子为指标, 识别沙漠化敏感区, 并进行高风险等级预警(Symeonakis et al, 2007; Salvati et al, 2011; Kosmas et al, 2014), 在地中海地区、巴西等地得到应用(Vieira et al, 2015; Karamesouti et al, 2018)。国内沙漠化敏感性研究则源于生态环境敏感性评价(欧阳志云等, 2000), 2015年颁发的《全国生态功能区划(修编版)》指出中国沙漠化敏感性主要受干燥度、大风日数、土壤性质和植被覆盖的影响, 国内学者将这些因子作为评价指标, 遵循“敏感因子选择—单因子敏感性评价—综合敏感性评价”思路, 在区域与流域尺度上开展了一系列个案研究(刘康等, 2002; 赵明月等, 2012)。然而, 相对于对沙漠化敏感性空间格局的高度关注, 探讨其时间动态的相关研究略显不足, 并且现有研究在指标选取、评价体系方面仍缺乏统一理论框架, 难以系统指导区域沙漠化防治。

内蒙古自治区大部地处于干旱半干旱区, 多年来受人类活动(如过度放牧、开垦、樵采)影响, 土地退化严重, 是中国沙漠化防治形势最为严峻的地区之一。为了减缓区域风沙危害、遏制沙化土地蔓延、改善沙区人民生活生产条件, 2000年起内蒙古自治区开展了退耕还林还草、京津风沙源治理、三北防护林等多项生态恢复工程, 基于沙漠化敏感性的评价, 可以有效评估这些生态工程的实施效果。因此, 本研究基于“压力—状态—响应(Pressure-State-Response, PSR)”框架, 构建“气候条件—地表覆盖—植被恢复”区域沙漠化敏感性评估指标体系, 对比分析2000、2015年内蒙古自治区(除流动沙地(丘)外)沙漠化敏感性, 并结合县域人口密度开展沙漠化防治分区, 以期有针对性地开展区域生态环境分区管控提供科学支撑。

2 研究区域与方法

2.1 研究区概况

内蒙古自治区位于中国北部(37°24'N~53°23'N, 97°12'E~126°04'E), 横跨东北、华北和西北地区,

内与8省区相邻, 外与蒙古国、俄罗斯接壤, 全区土地总面积约118.3万km²(图1)。区内气候以温带大陆季风性气候为主, 从东至西由湿润、半湿润区逐渐过渡到半干旱、干旱区, 年均气温0~8℃, 年降水量50~450 mm, 全年大风天数平均在10~40天; 地貌类型复杂多样, 以高原为主, 全区平均海拔大于1000 m, 自东向西分别呈现平原、山地与高原镶嵌分布; 随着气温与降水的梯度变化, 从东北—西南方向植被类型依次为森林、草原和荒漠(时忠杰等, 2011)。

改革开放以来, 内蒙古自治区经济发展迅速, 2015年全区生产总值达1.78万亿元, 人均地区生产总值超过7万元。长期以来, 农牧业在内蒙古自治区的产业中占主导地位, 但迫于人口压力, 种植业与畜牧业的矛盾日益突出, 草原垦殖、过度放牧等一系列不合理的人类活动在沙漠广布、干旱多风的自然条件下, 导致该区域成为我国沙漠化最严重的地区之一(江凌等, 2016), 沙漠化土地分布于全区12盟(市), 其中涉及76个旗(县、市、区)、近千个乡镇(苏木)。由于流动沙地(丘)植被覆盖率低(小于10%), 已形成沙漠区域, 而沙漠化敏感性是指区域发生土地沙漠化可能性的大小, 因此本文仅对内蒙古自治区除流动沙地(丘)以外的地区进行沙漠化敏感性评价。

2.2 沙漠化敏感性评价

PSR模型由经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)与联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)于20世纪80年代末共同提出,

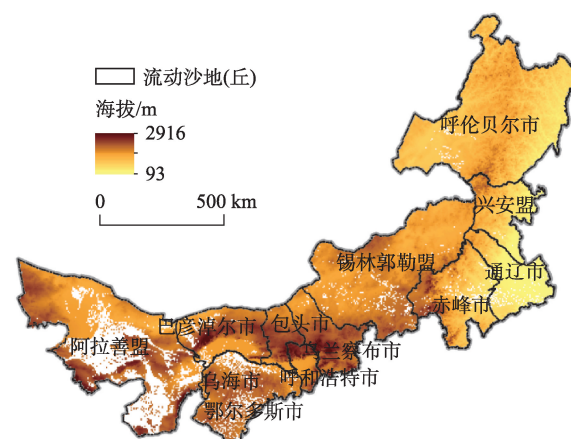


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

多用于区域可持续发展评估(彭建等, 2012)。其中,“压力”指外界对生态系统的干扰和胁迫,即产生某一生态问题的诱因;“状态”指外界压力下生态系统的当前状态,即生态系统某一方面的健康状况;“响应”指针对该生态问题所采取的应对措施或适应潜力,即生态系统对外界压力的反馈。生态敏感性是可持续发展评估的重要内容之一,而沙漠化敏感性则是生态敏感性的重要组成部分,因此,本文选用PSR模型构建沙漠化敏感性指标体系。

根据《全国生态功能区划(修编版)》,中国沙漠化敏感性主要受干燥度、大风日数、土壤性质和植被覆盖的影响。因此,本文分别从气候条件、地表覆盖、植被恢复等方面筛选压力、状态、响应指标。其中,压力指标由干燥度、冬春季大风天数构成,状态指标由沙地比例、土壤质地构成,响应指标由林草地变化率、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)构成(表1)。上述各指标通过栅格计算,将空间分辨率重采样至5 km×5 km,归一化后得到单因子敏感性指数,进而等权重加和得到沙漠化综合敏感性指数。由于沙漠化敏感性等级划分尚无统一标准,自然断点法作为一种基于数据分布特征的客观分级方法,能使平均离散方差组间最大而组内最小,常用于生态敏感性分级(陈盼盼等, 2017; 党国锋等, 2017),因此,本文借助这一方法对沙漠化综合敏感性指数进行分级,将评价结果划分为极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感和不敏感共5级。

2.2.1 压力指标

(1) 干燥度。干燥度能综合反映区域水热平衡状态,干燥度越高,生态系统承受压力越大,沙漠化敏感性越高。本文采用积温干燥度模型(郁家成等, 2008),计算公式如下:

$$K = \frac{0.16 \sum t}{r} \quad (1)$$

式中: K 为干燥度; $\sum t$ 为日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的稳定积温; r 为同时期的降雨量。

(2) 冬春季大风天数。风力强度影响土壤风蚀程度,冬春季多大风,是土壤沙化的源动力(张新时, 1994)。在地表土壤性质相同时,超过临界风速大风天数越多,土壤表面侵蚀程度越深。根据张国平等(2001)的研究,在半干旱风蚀区,冬春季风速大于6 m/s的大风天数,可以表征土壤风蚀强度,因此本文也采用这一指标表征压力。

表1 沙漠化敏感性评价指标体系

Tab.1 Index system of desertification sensitivity evaluation

目标层	准则层	指标层	归一化方法
沙漠化敏感性	气候条件(压力)	干燥度	正向归一化
		冬春季大风天数	正向归一化
	地表覆盖(状态)	沙地比例	正向归一化
		土壤质地	基岩为0, 粘质为0.25, 砾质为0.50, 壤质为0.75, 沙质为1
	植被恢复(响应)	林草地变化率	反向归一化
		NDVI	反向归一化

气温、降水和风速数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)提供的研究区周边257个气象站点2000、2015年观测数据,并通过Kriging插值得到空间分布图。

2.2.2 状态指标

(1) 沙地比例。沙地比例指沙地面积占区域土地总面积的百分比,是区域沙漠化状态在景观尺度的直观体现(张国平等, 2001; 王娅等, 2018)。通常来讲,沙地比例越高,区域土地发生沙漠化的可能性越大,即沙漠化敏感性越高。沙地分布来源于中国科学院资源环境科学数据中心的土地利用数据(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为1 km×1 km。

(2) 土壤质地。不同粒度的土壤颗粒抗风蚀能力不同,相同条件下,沙质土壤起沙率最大,其次分别为壤质、砾质、粘质土壤,基岩由于地表供沙率低,起沙率最低(Chepil, 1950; 张国平等, 2001)。因此,基岩、粘质、砾质、壤质和沙质土壤的沙漠化敏感性等级分别设为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感(赵明月等, 2012; 孙滨峰等, 2015),对应赋值为0、0.25、0.50、0.75和1。土壤质地分布主要基于中国1:100万土壤类型图。

2.2.3 响应指标

地表植被覆盖能反映区域生态恢复状况(刘康等, 2002),可用于表征生态系统对气候变化压力的响应。在林草地覆盖增加、植被长势好的区域,土地发生沙漠化的可能性小,沙漠化敏感性低;反之,在植被退化、地表裸露的区域,土地发生沙漠化的可能性大,沙漠化敏感性高;因此,本文选择林草地变化率和NDVI表征生态系统对外界压力的响应。2000、2015年林草地变化率分别由1985-2000、2000-2015年土地利用变化数据计算得到,土地利用数据则来源于中国科学院资源环境科学数据中

心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为1 km×1 km; NDVI数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为500 m×500 m。

3 结果与分析

3.1 单因子敏感性格局

3.1.1 压力因子

图2a是基于Kriging插值方法得到的2015年研究区干燥度敏感性空间格局。整体来看,内蒙古自治区干燥度自西向东空间变化显著,西北地区为高值区,向东北方向延伸干燥度逐渐降低。2015年研究区平均干燥度为3.87;高值主要位于阿拉善盟,平均干燥度达11.01,其中额济纳旗平均干燥度大于16,该区域属于典型的北温带大陆性干旱、极干旱荒漠草原气候,高温少雨,地表植被稀疏,土壤水分散失快,沙漠化敏感性高;巴彦淖尔、乌海、鄂尔多斯、包头等市为过渡地带,平均干燥度分别为5.77、4.48、3.79和3.29,属于干旱、半干旱区;东部地区干燥度总体偏低,尤其是东北部兴安盟、呼伦贝尔市,平均干燥度分别为1.23和1.46,该区域分布有科尔沁草原与呼伦贝尔草原,降水充沛,潜在蒸散低,属于湿润、半湿润草原气候,植被生长茂密,抗风蚀能力强,沙漠化敏感性低。

图2b是基于Kriging插值方法得到的2015年研究区冬春季大风天数敏感性空间格局。结果显示,2015年研究区冬春季大风天数在1.05~24.79天之间,平均大风天数达8.49天,总体属于大风多发区。从空间分布来看,区内冬春季大风天数呈明显的圈层结构,极高值出现在中部偏北地区的浑善达克沙

地和大兴安岭西麓呼伦贝尔沙地,向外扩展大风天数逐渐减少。乌兰察布市、锡林郭勒盟、包头市以及呼伦贝尔市西部新巴尔虎右旗冬春季大风频繁,平均大风天数分别为14.57天、14.06天、11.62天和8.64天;由于冬春季植被覆盖率较低,大风提供了沙丘移动的源动力,易发生土壤风蚀,沙尘天气常与大风天气相伴出现(李一平等,2013),因此这些区域沙漠化敏感性较高;极低值出现在呼伦贝尔市东部以及鄂尔多斯市的南部,该区域由于大风引起的土地沙漠化可能性相对较小,即沙漠化敏感性较低。

3.1.2 状态因子

内蒙古自治区沙地分布较为集中,主要位于西部巴丹吉林、乌兰布和、库布其、腾格里沙漠和毛乌素沙地(图3a),研究区域去除了流动沙地(丘)外,对半固定沙地及固定沙地比例进行统计,结果显示,半固定及固定沙地70.66%分布在西部的阿拉善、鄂尔多斯、锡林郭勒3盟(市),这些地区沙地蔓延扩散的可能性大,沙漠化敏感性极高;巴彦淖尔市、赤峰市、通辽市等盟(市)沙地分布较为零散,沙地比例在1%~10%之间,沙漠化敏感性较高;而东部的呼伦贝尔市、兴安盟,以及中部呼和浩特市、包头市和乌兰察布市,沙地比例均不足1%,沙漠化敏感性最低。

图3b显示了土壤质地沙漠化敏感性空间格局。总体来看,研究区土壤质地以壤质为主,集中分布在中部和东部地区;砾质和沙质土壤次之,主要分布在戈壁和沙漠周边,这是由于该区域土壤风蚀强烈,土壤中细颗粒含量较少所致;黏质土壤和基岩在全区范围内占比最小。从沙漠化敏感性来看,高值区主要分布于毛乌素沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地和库布其沙漠周边,这些区域沙质土壤

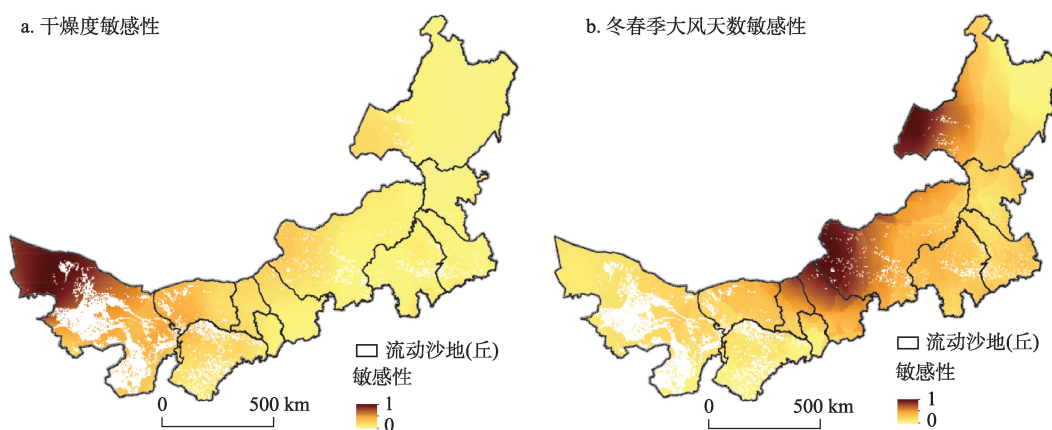


图2 2015年内蒙古自治区沙漠化敏感性压力因子空间格局

Fig.2 Spatial patterns of pressure factors of desertification sensitivity in Inner Mongolia Autonomous Region, 2015

占比高,土壤中黏粒含量少,不易形成团粒结构,抗剪切能力弱;其次为呼伦贝尔东部、兴安盟、锡林郭勒盟中部、阿拉善盟西部等地区,壤质土壤分布广泛;而巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、额济纳旗戈壁等地的边缘地带由于多年风蚀,细颗粒土壤流失,砾石含量高,不易被风力搬运,沙漠化敏感性相对较低。

3.1.3 响应因子

内蒙古自治区林草地覆盖率高,2015年林草地面积达67.22万 km^2 ,以草地为主。与2000年相比,该自治区林草地面积呈减少趋势,其中草地减少了4695 km^2 ,主要转变为林地和耕地;林地增加了1402 km^2 ,主要由耕地和草地转变而来。从空间分布来看(图4a),8.02%的地区林草地比例增加,集中分布于中部和西部,包括锡林郭勒盟、呼和浩特市、鄂尔多斯市、乌兰察布市、巴彦淖尔市等区域;

86.13%的地区林草地数量基本保持不变,在研究区分布广泛,属于中度敏感性区域;5.85%的地区林草地比例减少,集中分布于锡林郭勒盟和赤峰市。

NDVI可以表征区域地表植被的覆盖程度,而植被覆盖程度越高的地区发生沙漠化的概率越低,因此NDVI与沙漠化敏感性呈现负相关。研究区NDVI总体上呈现东高西低的空间格局,与区内水热条件分布格局高度吻合(图4b)。研究区东北部湿润地区降雨充沛,植被长势良好,植被类型以落叶阔叶林为主,NDVI平均值达0.47,沙漠化敏感性最低;东南部为半湿润区,NDVI平均值降至0.38,沙漠化敏感性相应升高;中部松辽平原西南部、大兴安岭南端等地区,位于温带半干旱气候带,NDVI平均值为0.24,该区域内西部植被类型以草甸草原和典型草原为主,东部为农牧交错带,沙漠化敏感性较高;研究区的西部主要分布沙漠、沙地,属于亚洲

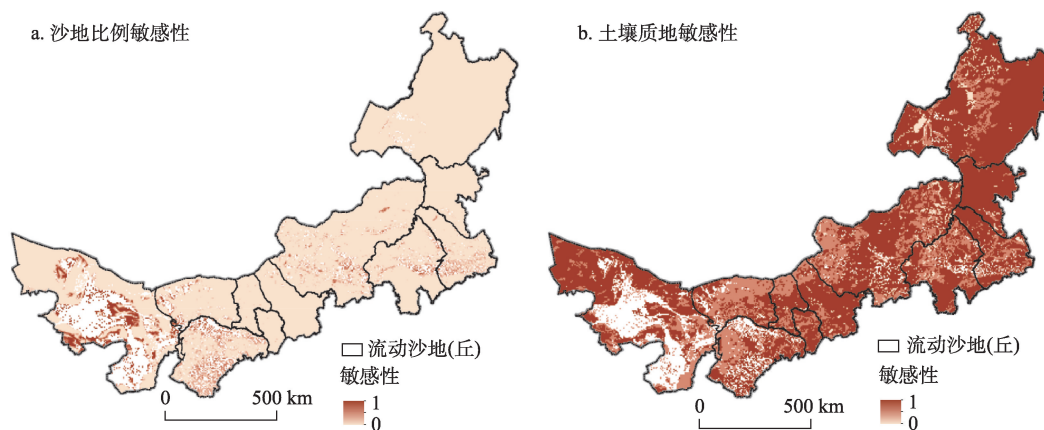


图3 2015年内蒙古自治区沙漠化敏感性状态因子空间格局

Fig.3 Spatial patterns of status factors of desertification sensitivity in Inner Mongolia Autonomous Region, 2015

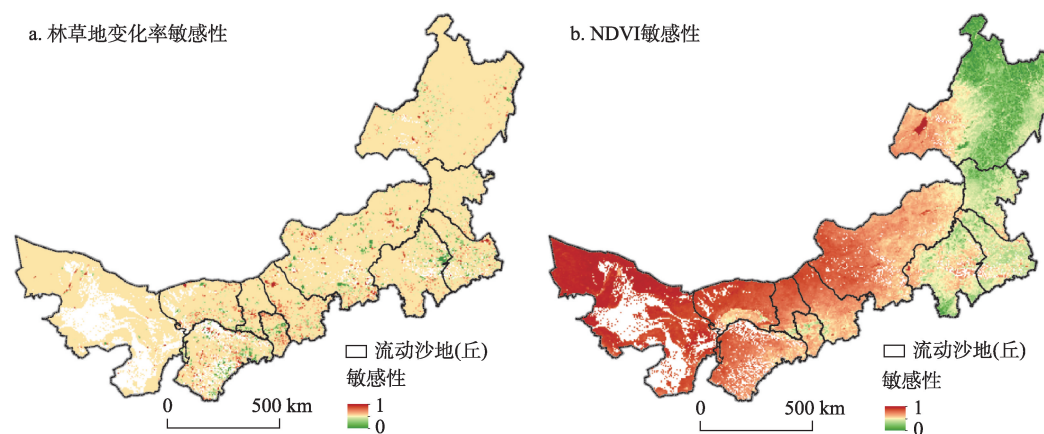


图4 2015年内蒙古自治区沙漠化敏感性响应因子空间格局

Fig.4 Spatial patterns of response factors of desertification sensitivity in Inner Mongolia Autonomous Region, 2015

荒漠植被区,植被稀疏,NDVI平均值仅为0.12,沙漠化敏感性最高。

3.2 综合敏感性时空变化

3.2.1 沙漠化敏感性空间分异

基于ArcGIS平台,对上述各单因子评价结果进行空间图层等权叠加,得到沙漠化综合敏感性指数,借助自然断点法将研究区分为极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感和不敏感5级(图5a)。其中,中度敏感区面积比例最高(27.04%),其次为轻度敏感区(25.53%)、不敏感区(22.96%)和高度敏感区(20.82%),极敏感区占比最小(3.65%)。从空间分布来看,研究区沙漠化敏感性呈现中西部高、东部低的空间格局,即:以大兴安岭和阴山山脉为分界线,分界线西北侧主要分布中度及以上敏感区,界线东南侧主要分布轻度敏感及不敏感区。其中,沙漠化极敏感区主要分布在巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、浑善达克沙地的边缘地带;高度敏感区环绕极敏感区分布,中度敏感区包围极敏感区和高度敏感区;轻度敏感区主要分布在毛乌素沙地、科尔沁沙地和呼伦贝尔沙地;不敏感区主要分布在大兴安岭以东的林草地覆盖区。

以盟(市)为单位对沙漠化敏感性程度进行分区统计,计算沙漠化敏感性各等级面积占区域土地总面积的比例,可发现内蒙古12盟(市)土地沙漠化敏感性程度差异较大(图5b)。具体而言,在包头市、乌兰察布市、巴彦淖尔市、锡林郭勒盟、阿拉善盟等5盟(市),中度及以上敏感区的土地面积占比均超过50%。其中,包头市、乌兰察布市、巴彦淖尔市以中度敏感区和高度敏感区为主;极敏感区面积占比阿

拉善盟最大,且该盟无不敏感区域。上述5盟(市)为巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布其、巴音温都尔等五大沙漠和浑善达克沙地的主要分布地,气候干旱,土地利用类型以沙地和低覆盖草地为主,土地沙化问题最为严重。乌海、呼和浩特、通辽、赤峰、兴安盟、鄂尔多斯6市(盟)以轻度敏感区为主,面积占比分别为69.84%、57.42%、52.89%、51.38%、50.36%、34.99%;由于呼伦贝尔市位于大兴安岭东麓呼伦贝尔草原,兴安盟位于科尔沁草原,林草覆盖度高,植被长势好,面对外界干扰不易发生沙漠化,呼伦贝尔市与兴安盟的不敏感区面积占比较大,分别为62.17%和48.64%。

3.2.2 沙漠化敏感性时间变化

如图6a所示,2000-2015年间内蒙古自治区9.20%的土地沙漠化敏感性等级有所降低,24.83%的土地等级增强,其余保持不变。具体来看,研究区沙漠化敏感性等级增强的土地,以轻度敏感转为中度敏感(34.15%)、中度敏感转为高度敏感(24.68%)、不敏感转为轻度敏感(24.14%)三种类型为主,集中分布于浑善达克沙地西北侧及其周边区域、呼伦贝尔沙地周边区域,以及乌兰布和、库布其、毛乌素等沙漠(沙地)周边区域;沙漠化敏感性等级不变的土地,主要位于阿拉善盟西侧及大兴安岭东侧等地区;沙漠化敏感性等级降低的土地,主要构成为由轻度敏感转向不敏感、中度敏感转向轻度敏感,集中分布于科尔沁大草原,以及阿拉善北部、鄂尔多斯东部等地区。

分别统计各盟(市)沙漠化敏感性等级变化面积占区域土地总面积的比例,可以看出内蒙古自治区

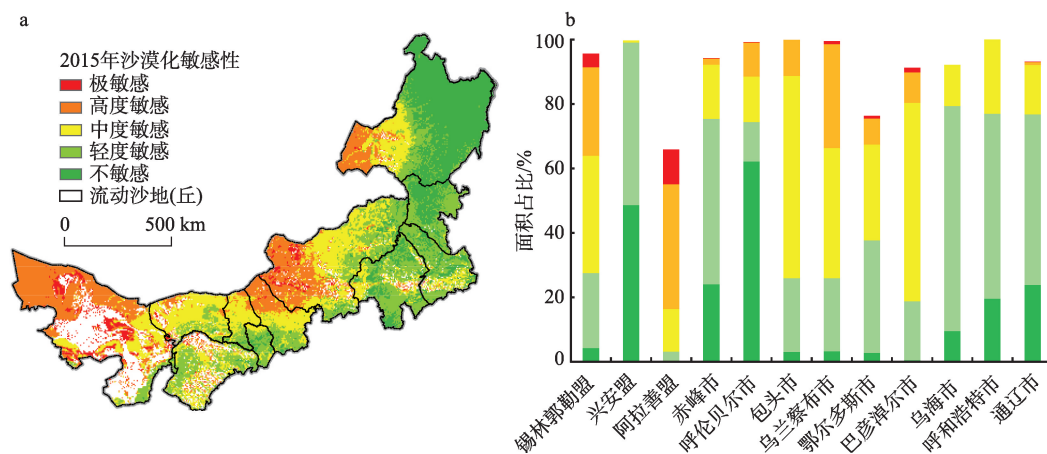


图5 2015年内蒙古自治区沙漠化敏感性空间分布

Fig.5 Spatial patterns of desertification sensitivity in Inner Mongolia Autonomous Region, 2015

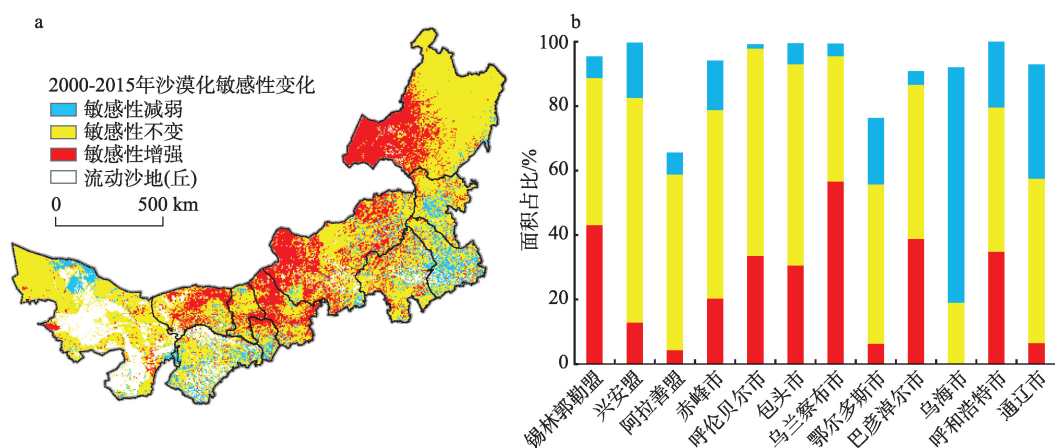


图6 2000-2015年内蒙古自治区沙漠化敏感性动态变化

Fig.6 Desertification sensitivity change in Inner Mongolia Autonomous Region, 2000-2015

12盟(市)沙漠化敏感性动态变化的空间分异特征明显(图6b)。具体而言,乌兰察布市和锡林郭勒盟敏感性等级增强的土地面积较大,占比分别为56.62%和43.09%,前者主要由于冬春季大风天数增多和植被退化,后者则因为冬春季大风天数增多及沙地蔓延。敏感性等级降低的土地面积比例,以乌海市和通辽市最高,分别为73.02%和35.41%。此外,乌海市无沙漠化敏感性增强的土地,说明该市发生沙漠化的可能性整体降低,这可能源于当地防风固沙林带的建设提高了植被覆盖度,极大地遏制了沙漠蔓延;而通辽市生态基础相对较好,植被覆盖高,近年来大风频率显著降低,其沙漠化敏感性也随之下降。其余8盟(市)以敏感性等级不变为主,但巴彦淖尔市、呼和浩特市、呼伦贝尔市、包头市分别有38.83%、34.87%、33.58%、30.60%的土地沙漠化敏感性等级增强,土地沙漠化防治亦不容乐观。

3.3 沙漠化防治分区及建议

人类既是沙漠化的诱发者也是承担者,一方面,伴随着人口增长压力,放牧、垦殖、樵采等人类活动加剧,沙漠化发生的可能性增加,人类活动成为沙漠化的诱因;另一方面,沙漠化造成的可利用土地资源减少、沙尘暴频发,不仅威胁人类健康,同时阻碍人民生活水平提高、社会经济发展。基于社会—生态耦合系统视角制定沙漠化防治策略,可作为内蒙古自治区各旗(县、市、区)社会经济发展与生态保护工作重点的基础。因此,本文以旗(县、市、区)为基本单元,基于2015年沙漠化综合敏感性评价结果与人口密度进行内蒙古自治区沙漠化防治分区;具体以综合敏感性指数和人口密度的中位数分别作为划分高一低敏感性、高一低人口密度的标

准,最终将全区102个旗(县、市、区)分为以下4个沙漠化防治区:Ⅰ.生态保育区(低人口密度—低敏感性),Ⅱ.沙化治理区(低人口密度—高敏感性),Ⅲ.综合发展区(高人口密度—低敏感性),Ⅳ.生态移民区(高人口密度—高敏感性)(图7)。

Ⅰ.生态保育区:该防治区包括鄂尔多斯市、赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市在内的15个旗(县、市、区),占内蒙古自治区土地总面积的23.27%。由于大部分位于半湿润、湿润区,土地利用类型以林地(49.78%)、草地(31.36%)为主,沙漠化敏感性以不敏感(71.21%)、轻度敏感(25.88%)为主;生态本底良好,植被覆盖度高,且人口稀疏,草场压力小。该区作为内蒙古自治区的生态屏障,应设立草原封育区,加强禁牧、休牧、轮牧等政策实施力度;同时,在该区西部与沙化治理区交界处应加强

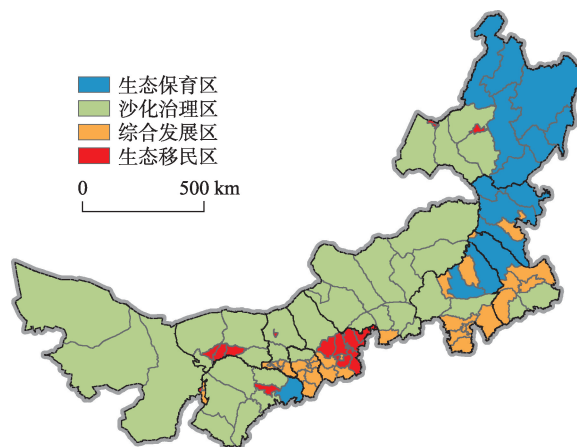


图7 内蒙古自治区沙漠化防治分区

Fig.7 Desertification controlling zones in Inner Mongolia Autonomous Region

生态恢复工程建设,强化绿色屏障,有效遏制沙漠化扩张。

Ⅱ. 沙化治理区:该防治区包括阿拉善盟、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市和呼伦贝尔市在内的36个旗(县、市、区),占内蒙古自治区土地总面积的65.48%。由于地处于干旱、半干旱区,土地利用类型以草地(52.71%)和裸地(38.91%)为主,是生态环境极度敏感区,沙漠化敏感性以中度敏感(38.09%)、高度敏感(33.16%)和轻度敏感(19.40%)为主。自然本底脆弱是该区沙漠化敏感性高的主要原因。作为内蒙古自治区沙漠集中分布区,应加强生态恢复工程实施力度,重点保护现存植被,持续建设人工防风固沙林,防止沙漠化土地蔓延、连通。

Ⅲ. 综合发展区:该防治区包括乌海市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市和兴安盟在内的35个旗(县、市、区),占内蒙古自治区土地总面积的8.42%。土地利用类型以耕地(38.64%)、草地(35.51%)为主,沙漠化敏感性以轻度敏感(63.68%)为主,作为各盟(市)市辖区所在地,人口密集、经济发展快、城市化水平高,生态条件相对较为优越,沙漠化敏感性较低。对于这类区域,应充分发挥生态与经济的双重优势,依托农牧交错带天然优势,推进绿色农牧业产业化发展,同时注意控制区域内部的矿产资源开发力度,推广发展生态经济和循环经济,重点打造社会—经济—生态协调发展的可持续型城市。

Ⅳ. 生态移民区:该防治区包括巴彦淖尔市、乌海市、鄂尔多斯市、包头市、乌兰察布市和呼伦贝尔市在内的16个旗(县、市、区),占内蒙古自治区土地总面积的2.83%。该区属于典型的农牧交错地带,土地利用类型以耕地(39.77%)、草地(42.23%)为主,沙漠化敏感性以中度敏感(59.57%)为主,区域整体沙漠化敏感性高,且人口密度大。今后一方面应持续推行生态恢复工程建设,对于低产耕地采取强制性退耕还林还草措施,鼓励农牧业集约化生产,积极建设绿色生态屏障;另一方面,对生态环境极度脆弱与敏感的地区,应强化落实生态移民政策,从根本上缓解草原生态压力。

4 结语

沙漠化敏感性评价是沙漠化防治的重要基础,

明晰沙漠化敏感性空间格局及其时间变化特征,对于生态环境分区管控具有重要的指导意义。本文基于“压力—状态—响应”分析框架,构建“气候条件—地表覆盖—植被恢复”沙漠化敏感性评价指标体系,对2000、2015年内蒙古自治区(除流动沙丘(地)外)沙漠化敏感性进行定量评估,并结合人口密度进行县域沙漠化防治分区。研究结果表明:

(1) 2015年研究区沙漠化敏感性呈现出中西部高、东部低的空间格局,以中度敏感区为主(27.04%),其次为轻度敏感区(25.53%)、不敏感区(22.96%)和高度敏感区(20.82%),极敏感区占比最小(3.65%);

(2) 2000-2015年研究区9.20%的土地沙漠化敏感性等级降低,以轻度敏感转向不敏感、中度敏感转向轻度敏感为主;24.83%的土地沙漠化敏感性等级增强,以轻度敏感转为中度敏感、中度敏感转为高度敏感、不敏感转为轻度敏感为主;

(3) 内蒙古自治区可分为生态保育区、沙化治理区、综合发展区、生态移民区等四大沙漠化防治区,分别包括15、36、35、16个旗(市、县、区)。

目前,沙漠化敏感性研究在评价框架及指标体系方面较为多样化,但其本质均是聚焦于地表覆盖状况、气候变化干扰、植被恢复响应等特征。本文基于PSR分析框架,评估了内蒙古自治区沙漠化敏感性时空动态变化,并制定了以县域为单元的沙漠化防治分区方案,在一定程度上弥补了以往“重评价、轻框架”、“重格局、轻动态”的研究不足。然而,本文仅以5 km×5 km格网作为沙漠化敏感性评价的基本单元,虽能基本满足省级尺度研究数据精度需求,但忽略了空间数据可能存在的“可塑性面积单元问题”,未来有必要进一步对比栅格、流域、行政单元等多尺度沙漠化敏感性评估结果。此外,本文对2000-2015年沙漠化敏感性时间动态变化的分析,是基于2000、2015年两期沙漠化敏感性评价结果展开的,可能在一定程度上忽略了区域沙漠化敏感性的年际变化过程,有待进一步整合时间序列数据明晰其年际动态特征,以期区域沙漠化防治提供更为详尽的科学依据。

参考文献(References)

- 常学礼,蔡明玉,张继平,等. 2009. 科尔沁沙地典型地区人工造林对沙漠化过程的影响[J]. 中国沙漠, 29(4): 611-616. [Chang X L, Cai M Y, Zhang J P, et al. 2009. Effect of artificial forestation on desertification in typical area of

- Horqin sandy land[J]. *Journal of Desert Research*, 29(4): 611-616.]
- 陈盼盼, 胡利利, 李亦秋, 等. 2017. 龙门山地区水土流失敏感性评价及其空间分异[J]. *水土保持通报*, 37(3): 237-241. [Chen P P, Hu L L, Li Y Q, et al. 2017. Sensitivity assessment and spatial distribution of soil erosion in Longmen Mountains region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 37(3): 237-241.]
- 陈玉福, 蔡强国. 2003. 京北浑善达克沙地荒漠化现状、成因与对策[J]. *地理科学进展*, 22(4): 353-359. [Chen Y F, Cai Q G. 2003. The status, causes and control of desertification in the Ortindag sandy land to the north of Beijing[J]. *Progress in Geography*, 22(4): 353-359.]
- 党国锋, 纪树志. 2017. 基于GIS的秦巴山区土地生态敏感性评价: 以陇南山区为例[J]. *中国农学通报*, 33(7): 118-127. [Dang G F, Ji S Z. 2017. Ecological sensitivity evaluation based on GIS in Qinba mountainous area: A case study of Longnan mountainous area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 33(7): 118-127.]
- 韩致文, 王涛, 董治宝, 等. 2004. 风沙危害防治的主要工程措施及其机理[J]. *地理科学进展*, 23(1): 13-21. [Han Z W, Wang T, Dong Z B, et al. 2004. Main engineering measurements and mechanism of blown sand hazard control [J]. *Process in Geography*, 23(1): 13-21.]
- 花婷, 王训明. 2014. 东亚干旱半干旱区沙漠化与气候变化相互影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 33(6): 841-852. [Hua T, Wang X M. 2014. Research progresses on the interaction between desertification and climate change in arid and semiarid East Asia[J]. *Progress in Geography*, 33(6): 841-852.]
- 江凌, 肖赓, 饶恩明, 等. 2016. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响[J]. *生态学报*, 36(12): 3734-3747. [Jiang L, Xiao Y, Rao E M, et al. 2016. Effects of land use and cover change (LUCC) on ecosystem sand fixing service in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(12): 3734-3747.]
- 李一平, 德勒格日玛, 斯琴, 等. 2013. 内蒙古沙尘天气少发季节沙尘天气预报技术分析[J]. *中国沙漠*, 33(5): 1483-1491. [Li Y P, Dele G, Si Q, et al. 2013. A synoptic analysis on forecasting of sand-dust storm in November over Inner Mongolia[J]. *Journal of Desert Research*, 33(5): 1483-1491.]
- 刘康, 徐卫华, 欧阳志云, 等. 2002. 基于GIS的甘肃省土地沙漠化敏感性评价[J]. *水土保持通报*, 22(5): 29-31, 35. [Liu K, Xu W H, Ouyang Z Y, et al. 2002. GIS-based assessment on sensitivity to land desertification in Gansu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 22(5): 29-31, 35.]
- 刘彦随, Gao J. 2002. 陕北长城沿线地区土地退化态势分析[J]. *地理学报*, 57(4): 443-450. [Liu Y S, Gao J. 2002. Trend analysis of land degradation in the zone along the Great Wall in northern Shaanxi[J]. *Acta Geographica Sinica*, 57(4): 443-450.]
- 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 2000. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. *生态学报*, 20(1): 9-12. [Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. 2000. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 20(1): 9-12.]
- 彭建, 吴健生, 潘雅婧, 等. 2012. 基于PSR模型的区域生态持续性评价概念框架[J]. *地理科学进展*, 31(7): 933-940. [Peng J, Wu J S, Pan Y J, et al. 2012. Evaluation for regional ecological sustainability based on PSR model: Conceptual framework[J]. *Progress in Geography*, 31(7): 933-940.]
- 时忠杰, 高吉喜, 徐丽宏, 等. 2011. 内蒙古地区近25年植被对气温和降水变化的影响[J]. *生态环境学报*, 20(11): 1594-1601. [Shi Z J, Gao J X, Xu L H, et al. 2011. Effect of vegetation on changes of temperature and precipitation in Inner Mongolia, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 20(11): 1594-1601.]
- 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.]
- 王涛, 朱震达. 2003. 我国沙漠化研究的若干问题: 1. 沙漠化的概念及其内涵[J]. *中国沙漠*, 23(3): 209-214. [Wang T, Zhu Z D. 2003. Study on sandy desertification in China: 1. Definition of sandy desertification and its connotation[J]. *Journal of Desert Research*, 23(3): 209-214.]
- 王娅, 周立华, 魏轩. 2018. 基于社会—生态系统的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系[J]. *生态学报*, 38(3): 829-840. [Wang Y, Zhou L H, Wei X. 2018. An evaluation index system of vulnerability of the desertification reversion process based on the socio-ecological systems theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 829-840.]
- 薛炯, 王涛, 吴薇, 等. 2005. 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*, 25(3): 320-328. [Xue X, Wang T, Wu W, et al. 2005. Desertification development and its causes of agro-pastoral mixed regions in north China[J]. *Journal of Desert Research*, 25(3): 320-328.]

- 郁家成, 吴长春, 黄小燕, 等. 2008. 中值温度和干燥度指数计算及其应用的简便方法[J]. 生态学报, 28(10): 5039-5046. [Yu J C, Wu C C, Huang X Y, et al. Convenient method of calculation and application of median temperature and aridity index[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(10): 5039-5046.]
- 张国平, 张增祥, 刘纪远. 2001. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. 地理学报, 56(2): 146-158. [Zhang G P, Zhang Z X, Liu J Y. 2001. Spatial distribution of aeolian erosion of soil and its driving factors in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 56(2): 146-158.]
- 张新时. 1994. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式[J]. 植物生态学报, 18(1): 1-16. [Zhang X S. 1994. Principles and optimal models for development of Maowusu Sandy Grassland[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 18(1): 1-16.]
- 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 2007. 沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理[M]. 北京: 科学出版社. [Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, et al. 2007. Bioprocess of desertification and restoration mechanism of degraded vegetation [M]. Beijing, China: Science Press.]
- 赵明月, 赵文武, 靳婷, 等. 2012. 青海湖流域土地沙漠化敏感性评价[J]. 中国农学通报, 28(32): 237-242. [Zhao M Y, Zhao W W, Jin T, et al. 2012. Land desertification sensitivity evaluation in Qinghai Lake Basin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(32): 237-242.]
- 郑晓静, 王萍. 2006. 风沙流中沙粒随机运动的数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 26(2): 184-188. [Zheng X J, Wang P. 2006. Numerical simulation on stochastic movement of sands in wind-blown sand[J]. *Journal of Desert Research*, 26(2): 184-188.]
- 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 2010. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. 地理科学进展, 29(9): 1087-1094. [Zhu J F, Wang N A, Chen H B, et al. 2010. Study on the boundary and the area of Badain Jaran Desert based on remote sensing imagery[J]. *Progress in Geography*, 29(9): 1087-1094.]
- 朱震达, 王涛. 1992. 中国沙漠化研究的理论与实践[J]. 第四纪研究, 12(2): 97-106. [Zhu Z D, Wang T. 1992. Theory and practice on sandy desertification in China[J]. *Quaternary Sciences*, 12(2): 97-106.]
- 朱震达. 1991. 中国的脆弱生态带与土地荒漠化[J]. 中国沙漠, 11(4): 11-22. [Zhu Z D. 1991. Fragile ecological zones and land desertification in China[J]. *Journal of Desert Research*, 11(4): 11-22.]
- UN. 1994. 联合国关于在发生严重干旱和/或沙漠化的国家特别是在非洲防治沙漠化的公约[M]. 中华人民共和国林业部防治沙漠化办公室, 译. 北京: 中国林业出版社. [UN. 1994. United nations convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa[M]. Combat desertification office of Ministry of Forestry in the People's Republic of China, Trans.. Beijing, China: China Forestry Press]
- Chepil W S. 1950. Properties of soil which influence wind erosion: I. The governing principle of surface roughness[J]. *Soil Science*, 69(2): 149-162.
- D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, et al. 2013. Global desertification: Drivers and feedbacks[J]. *Advances in Water Resources*, 51: 326-344.
- Diouf A, Lambin E F. 2001. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: Remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal[J]. *Journal of Arid Environments*, 48(2): 129-148.
- Karamesouti M, Panagos P, Kosmas C. 2018. Model-based spatio-temporal analysis of land desertification risk in Greece[J]. *Catena*, 167: 266-275.
- Kosmas C, Kairis Or, Karavitis Ch, et al. 2014. Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: Methodological Approach[J]. *Environmental Management*, 54(5): 951-970.
- Lamchin M, Lee W K, Jeon S W, et al. 2017. Correlation between desertification and environmental variables using remote sensing techniques in Hognokhaan, Mongolia[J]. *Sustainability*, 9(4): 581.
- Landry W, Werner B T. 1994. Computer simulations of self-organized wind ripple patterns[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 77(1-3): 238-260.
- Lavee H, Imeson A C, Sarah P. 1998. The impact of climate change on geomorphology and desertification along a mediterranean-arid transect[J]. *Land Degradation & Development*, 9(5): 407-422.
- Rubio J L, Bochet E. 1998. Desertification indicators as diagnosis criteria for desertification risk assessment in Europe [J]. *Journal of Arid Environments*, 39(2): 113-120.
- Salvati L, Bajocco S. 2011. Land sensitivity to desertification across Italy: Past, present, and future[J]. *Applied Geography*, 31(1): 223-231.
- Song X, Wang T, Xue X, et al. 2015. Monitoring and analysis of aeolian desertification dynamics from 1975 to 2010 in the Heihe River Basin, north western China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 74(4): 3123-3133.

Symeonakis E, Calvo-Cases A, Arnau-Rosalen E. 2007. Land use change and land degradation in southeastern Mediterranean Spain[J]. *Environmental Management*, 40(1): 80-94.

Vieira R M S P, Tomasella J, Alvalá R C S, et al. 2015. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast[J]. *Solid Earth*, 6: 347-360.

Desertification sensitivity evaluation in Inner Mongolia Autonomous Region based on PSR framework

TIAN Lu^{1,2}, QIU Sijing¹, PENG Jian^{1,2*}, HU Yina¹, JIA Jinglei^{1,2}, MAO Qi¹

(1. Ministry of Education Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: Desertification sensitivity is a key indicator for detecting the probability of desertification, and its assessment is of great importance for desertification control. Previous studies assessed regional desertification sensitivity without a unified framework, and many studies only focused on the spatial patterns of desertification sensitivity but ignored the temporal dynamics. Thus, this study aimed to develop an index system to assess desertification sensitivity based on the framework of pressure-state-response (PSR) from three aspects: climatic conditions, land cover, and vegetation restoration. It took Inner Mongolia Autonomous Region as the study area (excluding mobile sand dune areas), with a study period from 2000 to 2015. Desertification control zoning was also carried out by combining desertification sensitivity and population density analyses at the county level. The results show that, in view of the spatial patterns, desertification sensitivity in 2015 was higher in the central and western parts of the study area, and lower in the east. Desertification sensitivity in 2015 was classified using natural break point method. The moderate sensitivity zone (27.04%) accounted for the largest proportion of the study area, followed by low sensitivity zone (25.53%), no sensitivity zone (22.96%), high sensitivity zone (20.82%), and extreme sensitivity zone (3.65%) in descending order. The temporal dynamics during 2000-2015 in the study area showed that 9.20% of the study area experienced decreasing desertification sensitivity, and 24.83% of the study area experienced increasing desertification sensitivity. Finally, the study area was divided into four desertification control zones, that is, ecological conservation zone, desertification control zone, comprehensive development zone, and ecological migration zone.

Key words: desertification sensitivity; PSR framework; control zone; Inner Mongolia Autonomous Region