

基于MODIS-NDVI的2000—2018年中国北方 土地沙化敏感性时空变化

徐玲玲, 延昊, 钱拴

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 选择植被覆盖度、湿润指数、大风日数、土壤表层砂粒含量和坡度5个因子作为评价指标, 基于多源数据开展了中国北方14省(区)2000—2018年土地沙化敏感性空间分布格局及其动态变化研究, 并按土地易起沙尘程度的高低依次划分为极易起沙尘和高度易起沙尘(高敏感等级)、中等易起沙尘(中敏感等级)、轻度易起沙尘和不易起沙尘(低敏感等级)。结果表明: 2000—2018年中国北方14省(区)处于土地沙化高敏感等级的面积从48.1%下降至40.4%, 处于土地沙化低敏感等级的面积从30.3%上升至38.8%, 整体呈土地沙化高敏感等级向中、低敏感等级过渡的趋势。与2000年相比, 2018年内蒙古科尔沁、浑善达克和毛乌素沙地及其周边区域极易起沙尘和高度易起沙尘的土地面积明显减小, 植被覆盖度的增加和大风日数的减少是这种变化的重要原因。

关键词: 土地沙化; 敏感性; 时空格局变化; 北方地区

土地沙化是指干旱半干旱及部分湿润地区, 恶劣的自然条件或人类不合理的经济活动破坏了生态系统的平衡, 导致地表植被衰退或消失后, 风作用于地表产生的风蚀、搬运、堆积的风沙运动过程, 最终造成地表出现以风沙活动为主要标志的土地退化^[1,2]。中国是世界上沙化土地面积大、分布广、危害重的国家之一, 严重的土地沙化威胁着中国生态安全和社会经济的可持续发展^[3,4]。国家林业局第五次全国荒漠化和沙化监测数据显示, 截至2014年, 全国沙化土地总面积为1721175 km², 占国土总面积的17.93%; 其中新疆、内蒙古、西藏、青海、甘肃五省(区)沙化土地面积占全国沙化土地总面积的93.95%, 比例依次为43.40%、23.70%、12.54%、7.24%和7.07%^[5]。中国北方沙化土地主要分布在35°~50°N的内陆盆地和高原, 这一地区自然生态环境脆弱, 长期以来人类活动的干扰导致干旱频发、水土流失加剧、土地沙漠化扩大, 生态安全受到严重威胁^[6-9]。因此, 针对中国北方地区开展土地沙化分布格局的时空变化动态研究, 对合理开发利用土地资源, 控制土地沙化的发生、发展以及区域生态安全和可持续发展都具有重要意义。

土地沙化敏感性指自然环境变化和人类活动干扰引起土地沙漠化的可能性大小^[10]。研究其敏感程度和空间分布是评价自然生态系统防风固沙服务功能的重要组成部分, 同时能够为实施宏观生态环境分区管理提供理论依据。近年来, 遥感和地理信息技术发展迅速, 正逐渐成为宏观尺度上土地沙化敏感性定量评价和防风固沙功能评估的重要技术手段。刘康等^[11]、冯宇等^[12]基于植被覆盖度、湿润指数、大风日数、土壤可蚀性等指标

收稿日期: 2019-01-24; 修订日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700421); 国家气象中心2018年气象现代化建设专项

作者简介: 徐玲玲(1979-), 女, 山东泰安人, 博士, 高级工程师, 主要从事生态气象相关的业务和科研工作。

E-mail: xulingling2001@126.com

分别对甘肃省和内蒙古呼伦贝尔地区土地沙化敏感性的空间分布格局和防风固沙功能重要性进行了分析。赵明月等^[13]以青海湖流域为研究区,根据《生态功能区划技术暂行规程》对土地沙漠化敏感性进行综合评价。王小军等^[14]利用遥感影像及解译和转移矩阵分析,研究了甘肃省沙漠化土地面积、程度、类型变化及区域差异。王跃辉等^[15]从自然因素和人为因素两个角度出发,运用CA-Markov耦合模型对土地沙漠化敏感性格局变化趋势进行了预测。目前已有的土地沙化敏感性研究多集中在沙漠边缘等风蚀较为严重的省份和地区,针对中国整个北方地区土地沙化敏感性的现状、时间和空间尺度上的发展及逆转变化情况等方面的研究相对较少。本文以中国北方14省(区)为研究对象,基于MODIS遥感、气象要素和土壤资料等多源数据开展2000—2018年土地沙化敏感性的现状和时空格局动态变化研究,以期为中国北方地区防风固沙生态功能评估以及制定相关生态功能区划提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

中国北方沙化土地主要分布在35°~50°N之间的内陆盆地和高原,形成一条西起塔里木盆地两端,东至松嫩平原西部,横贯西北、华北和东北地区,东西长达4500 km、南北宽约600 km的区域。据此将新疆维吾尔自治区、西藏自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省、山西省、河北省、河南省、山东省、内蒙古自治区、黑龙江省、吉林省、辽宁省,共计14个省(区)作为本次研究的对象。该区域大致涵盖了中国西部、西北部和东部三大沙区,气候类型分别属高原高山气候、温带大陆性气候和温带季风气候。

1.2 数据来源

遥感数据采用2000—2018年覆盖研究区域的MOD13C2归一化差值植被指数(NDVI)数据集,数据格式为MOD13C2 Terra MODIS Vegetation Indices 5600 Monthly(数据下载地址:<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/>)。该数据来源于美国Terra卫星上MODIS传感器,为最新的第6版月最大值合成产品,空间分辨率为0.05度(约5.6 km)。NDVI是由经过大气辐射订正的MODIS红光波段和近红外波段反射率计算得到。此外,MOD13C2产品还提供了NDVI数据质量标记(Quality Assurance)。本研究对标记受云等噪音影响的数据进行了剔除,并采用临近的高质量NDVI数据对剔除象元进行空间插值。

气象数据采用2000—2018年研究区北方14个省(区)1249个气象站点逐日平均气温、降水量、平均风速数据以及各气象站点经纬度、1 km网格DEM高程数据等资料,数据来源于国家气象中心信息资料室。此外,还收集了中国科学院南京土壤研究所1:100万土壤属性栅格数据,提取土壤剖面分层深度为0~10 cm的土壤砂粒含量作为本研究的土壤表层砂粒含量数据。

1.3 研究方法

1.3.1 土地沙化敏感性评价因子及其计算方法

研究表明,不同植被覆盖和地形条件下,土壤受到风力、降水等气候因素的侵蚀各不相同,导致不同区域的沙化程度存在较大差异^[6]。植被覆盖度是影响土地沙化敏感性

的一个重要因素,一般与土壤风蚀量呈负相关关系^[17]。植被覆盖度越低,植被生长越稀少,越容易导致地表裸露,表层土壤为强风提供沙尘的可能性就越高。湿润指数常用于衡量某个区域热量和水分之间的相互作用关系,反映了降水对土壤风力侵蚀的作用。湿润指数越小,表明区域气候越干燥,受到风力侵蚀的可能性越大。大风是土壤风蚀的起因和外动力,风力强度是影响风对土壤颗粒搬运的重要因素。大风日数越多、持续时间越长,对地表土壤的风力侵蚀作用越大。坡度体现了区域地形自身对风蚀的抗蚀性,坡度陡的区域对风速起到一定的阻滞作用。不同的土壤质地对风蚀也存在差异。相同条件下,黏质土壤易形成团粒结构,抗剪能力增强;砂质结构的土壤相对容易起沙。据此,考虑将植被覆盖度 C 、湿润指数 I 、大风日数 W 、坡度 P 和土壤表层砂粒含量 S 五个因子作为此次北方14省(区)土地沙化敏感性的评价指标。

(1) 植被覆盖度 C

$NDVI$ 是反映植被生长状况的基本参数,可较好地反映区域植被覆盖度及年际空间分布差异。将 $NDVI$ 代入像元二分模型,即可得出基于 $NDVI$ 的植被覆盖度。

$$C = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (1)$$

式中: $NDVI_{soil}$ 为全部由裸土覆盖区域的 $NDVI$ 值; $NDVI_{veg}$ 为全部由植被覆盖区域的 $NDVI$ 值; C 为植被覆盖度; $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 的值是像元二分模型的关键,通常为遥感影像中置信区间内的最大值 $NDVI_{max}$ 和最小值 $NDVI_{min}$ 。本文通过统计 $NDVI$ 数据的直方图,分别在累积概率95%和5%处确定 $NDVI_{max} = 0.84$ 和 $NDVI_{min} = 0.05$ 。即 $NDVI$ 大于等于0.84时,认为地表100%有植被覆盖; $NDVI$ 小于等于0.05时,认为地表是裸地。

(2) 湿润指数 I

湿润指数是干燥度的倒数,计算方法为降水量与潜在蒸散量之比^[18]。

$$I = \frac{P}{ET_0} = \frac{P}{K \times BT} = \frac{P}{K \times (\sum t / 365)} \quad (2)$$

式中: P 为降水量(mm); ET_0 为潜在蒸散量(mm)。 K 为常数,经验取值为58.93; BT 为平均生物温度(°C),取值范围在0~30°C之间; t 为日平均温度(°C),当 t 大于30°C时按30°C计算,低于0°C时按0°C计算。

(3) 大风日数 W

研究表明,砂质土壤的起沙风速为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[12,19]。根据研究区气象站点2000-2018年的大风数据,逐年统计风速大于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的天数。

(4) 坡度 P

基于研究区1 km网格的DEM高程数据,利用ArcGIS 10.2栅格坡度计算功能实现栅格的坡度计算。

(5) 土壤表层砂粒含量 S

基于研究区1:100万土壤表层砂粒含量栅格数据,根据栅格的经纬度信息矢量化建立图层。

为了便于分析,采用反距离权重法IDW将基于气象站点统计的离散的湿润指数和大风日数进行空间插值,得到矢量化图层;将已经栅格化的坡度和土壤表层砂粒含量数据进行重采样,以上各项数据的空间分辨率均统一成5.6 km,地图投影采用Albers等面积投影,以便与遥感影像完全匹配。

1.3.2 土地沙化不同等级敏感性综合评估

(1) 土地沙化敏感性定量评估模型 依据评价结果的可比性原则以及研究区域实际情况,按照极易起沙尘、高度易起沙尘、中等易起沙尘、轻度易起沙尘和不易起沙尘五个等级将植被覆盖度、湿润指数、大风日数、坡度和土壤表层砂粒含量进行级别划分,并分级进行赋值。赋值越大表明土地沙化的敏感性越高,越容易起沙尘;赋值越小表明土地沙化的敏感性越低,越不易起沙尘(表1)。其中,极易起沙尘和高度易起沙尘属土地沙化高敏感等级,中等易起沙尘属中敏感等级,轻度易起沙尘和不易起沙尘属低敏感等级。

表1 土地沙化敏感性评价因子分级标准及赋值

Table 1 Classification criteria and valuation of land desertification sensitivity assessment factors

指标	植被覆盖度	湿润指数	易起沙尘大风日数/d	坡度/(°)	土壤砂粒含量/%	分级赋值
极易起沙尘	0~0.15	<0.4	>60	0~1	>0.6	9
高度易起沙尘	0.15~0.3	0.4~0.55	40~60	1~2	0.5~0.6	7
中等易起沙尘	0.3~0.45	0.55~0.65	20~40	2~4	0.4~0.5	5
轻度易起沙尘	0.45~0.6	0.65~0.75	10~20	4~6	0.3~0.4	3
不易起沙尘	0.6~1	>0.75	<10	>6	<0.3	1

采用加权求和的方法计算土地沙化敏感性综合指数,定量化评估植被覆盖度、湿润指数、大风日数、坡度和土壤表层砂粒含量5个因子对土地易起沙尘程度的影响。

$$D_j = \sum A(i, j) K_{i,j} \quad (3)$$

式中: D_j 为 j 空间单元土地沙化敏感性综合指数; $A(i, j)$ 为 j 空间单元第 i 个土地沙化敏感性评价因子的等级值 ($i=5$); $K_{i,j}$ 为 j 空间单元第 i 个土地沙化敏感性评价因子的权重。

(2) 评价因子权重系数的确定 应用层次分析法(AHP)确定土地沙化敏感性综合评估模型中各项因子的权重系数(表2)。首先将参与土地沙化敏感性评估的5项评价因子两两比较,并按照 Thomas L.Saaty 标度的1~9比例标度对其重要程度进行赋值,1、3、5、7、9表示因素 a 与因素 b 相对某属性来说重要性从同等到极端重要的区间判断,2、4、6、8表示两相邻判断的中间值,若元素 a 与元素 b 的重要性之比为 $m_{a,b}$,则元素 b 与元素 a 的重要性之比为 $m_{a,b}$ 的倒数,专家打分后可以得到一个5阶判断矩阵。经层次单排序求解判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 及其特征向量 W ,计算一致性指标 CI ,并将5阶判断矩阵的 RI 值1.12代入式(4)进行检验,得到随机一致性比率 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1) \times RI} = \frac{(5.43892 - 5)}{4 \times 1.12} = 0.097 \quad (4)$$

表2 土地沙化敏感性评价指标体系及其权重

Table 2 Factors and their weight of land desertification sensitivity assessment

目标层	准则层	指标层	指标层权重	与土地沙化敏感性的关系
土地沙化敏感程度评价	植被状况	植被覆盖度	0.51	密切相关
		大风日数	0.25	高度相关
	气候条件	湿润指数	0.15	中等相关
		土壤质地	土壤表层砂粒含量	0.06
	地形条件	坡度	0.03	一般相关

注:气候条件的权重由大风日数和湿润指数综合决定。

由于 $CR \leq 0.1$, 认为判断矩阵的一致性通过检验, 特征向量即为权向量(0.5087, 0.2504, 0.1496, 0.0617, 0.0296)。据此确定本研究土地沙化敏感性评价因子的权重依次为: 植被覆盖度(0.51)、大风日数(0.25)、湿润指数(0.15)、土壤表层砂粒含量(0.06)和坡度(0.03)。

(3) 土地沙化敏感性综合指数的分级 对于不同空间单元土地沙化敏感性综合指数, 根据自然断点法确定极易起沙尘(>7.5)、高度易起沙尘(6~7.5)、中等易起沙尘(4.5~6)、轻度易起沙尘(3~4.5)和不易起沙尘(<3) 5个等级的阈值范围, 据此开展2000—2018年中国北方14省(区)土地沙化敏感时空格局现状及动态变化研究。

2 结果分析

2.1 北方14省(区)土地沙化敏感性随时间变化

图1为2000—2018年中国北方14省(区)不同等级土地沙化敏感性面积比例随时间的变化趋势。2000年以来, 中国北方地区高度和极易起沙尘的土地面积从48.1%降至40.4%, 平均每年下降0.4%, 整体呈缓慢下降的趋势; 轻度和不易起沙尘的土地面积从2000年的30.3%上升至2018年38.8%, 呈缓慢增加的趋势; 处于中等易沙化等级的土地面积相对比较稳定, 维持在20%左右。这表明中国北方地区土地沙化的敏感性程度整体呈下降趋势, 高度和极易起沙尘的土地正逐渐向中度、轻度和不易起沙尘过渡, 土地荒漠化总体遏制, 植被防风固沙生态功能显著提升。

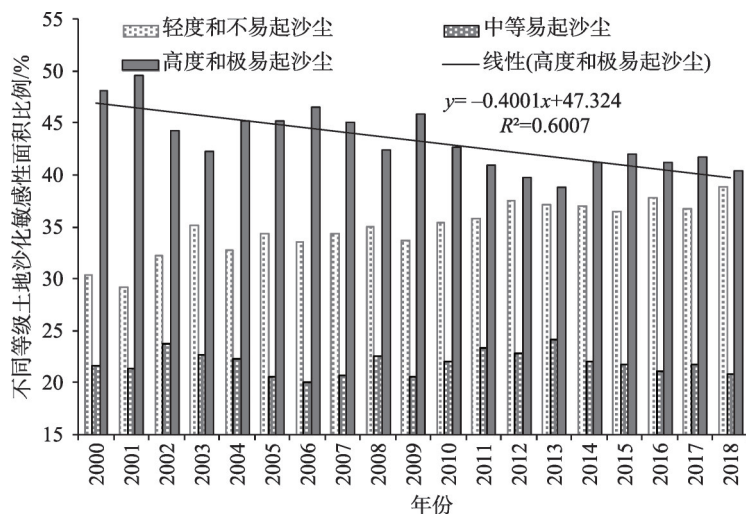


图1 2000—2018年我国北方14省(区)不同等级土地沙化敏感性面积比例变化

Fig. 1 Change of land desertification sensitivity area in different grades in 14 provincial-level regions of Northern China from 2000 to 2018

2.2 北方14省(区)土地沙化敏感性空间格局变化

2000年、2010年和2018年三期土地沙化敏感性空间分布格局显示, 土地沙化属高敏感等级(高度易起沙尘和极易起沙尘)的区域主要分布在中国西部和北部的沙漠聚集地带及其临近区域, 植被覆盖度低、气候干燥多风; 属土地沙化低敏感等级(轻度易起沙尘和不易起沙尘)的区域主要分布在大小兴安岭、长白山、秦岭等植被覆盖度高、气候相对

湿润的山川地带；属土地沙化中敏感等级的区域大都分布在二者的缓冲区域（图2）。与2000年相比，2018年中国西部和北部主要沙漠聚集区土地沙化敏感性总体保持稳定，但部分区域土地沙化状况开始逆转，生态环境整体向好。

图2a、图2c及分省统计结果显示，与2000年相比，2018年新疆、西藏、青海、甘肃、内蒙古、宁夏六省（区）属土地沙化高敏感等级的面积占本省土地总面积的比例分别下降了4.7、3.8、6.3、7.3、13.5和53.4个百分点，其中内蒙古和宁夏土地易起沙尘的程度明显减弱。2000年内蒙古东南部的科尔沁沙地、锡林郭勒盟中部的浑善达克沙地、内蒙古西部的毛乌素沙地、宁夏及其周边区域多为高度易起沙尘和极易起沙尘等级，至2018年处于土地沙化高敏感等级的土地面积明显减小，逐渐向中等易起沙尘和轻度易起沙尘过渡。青海柴达木盆地东南缘、甘肃河西及陇中地区高度易起沙尘的土地面积也呈缩减趋势，中等和轻度易起沙尘的土地面积比例上升。陕西省北部的黄土高原、河北省北部张北、坝上等区域也由2000年的轻度易起沙尘逐渐转化为2018年的不易起沙尘。

2.3 植被覆盖度增加和大风日数减少是土地沙化敏感性降低的重要原因

2000年以来，中国北方14省（区）整体呈“气温上升，降水增多”的趋势，区域年平均气温升高幅度为每10年0.28℃，区域年降水量平均每年增加约2.3mm（图3a）。热量增加、降水增多对植被恢复和生长有利，加之近年来“三北”防护林、“风沙源治理”“退耕还林还草”等一系列生态工程的实施，植被覆盖状况明显改善。遥感监测结果显示，2000年以来除新疆南部、西藏中部、青海南部等地部分区域植被覆盖度略有下降外，其余北方大部地区植被长势整体趋好，尤其是西北地区东部、华北地区西部和北部、东北地区北部等地19年内植被覆盖度明显提升，平均每年增加幅度约0.5%~0.75%（图4）。地表植被覆盖状况越好，对表层土壤的保护能力越强，为强风提供沙尘的可能性越小，在一定程度上对土地沙化状况起到了遏制和扭转作用。同时，2000—2018年北方14省（区）区域年平均易起沙尘大风日数整体呈下降趋势，如图3b所示，2000年和2001年区域年平均大风日数分别为12.8d和13.0d，2002年开始波动性下降，至2011年大风日数不足8d；之后缓慢增加，2018年区域年平均大风日数为11.0d。大风是地表土地沙化的重要外在驱动因子，大风日数的减少削弱了强风对表层土壤的风蚀作用，也是土地沙化敏感性降低的一个重要因素。

3 结论与讨论

3.1 结论

（1）选择植被覆盖度、湿润指数、大风日数、坡度和土壤表层砂粒含量五个因子作为评价指标，基于ArcGIS平台开展了中国北方14省（区）2000—2018年土地沙化敏感性空间分布格局及其动态变化研究。2000—2018年中国北方14省（区）属沙化高敏感等级的土地面积从48.1%下降至40.4%，属沙化低敏感等级的土地面积从30.3%上升至38.8%，土地沙化的敏感性程度整体呈下降趋势，正逐渐由高度和极易起沙尘向中度、轻度和不易起沙尘过渡。

（2）与2000年相比，2018年中国北方主要沙漠聚集区土地沙化敏感性总体保持稳定，但分布在内蒙古、宁夏、河北等地的毛乌素沙地、科尔沁沙地、浑善达克沙地及其

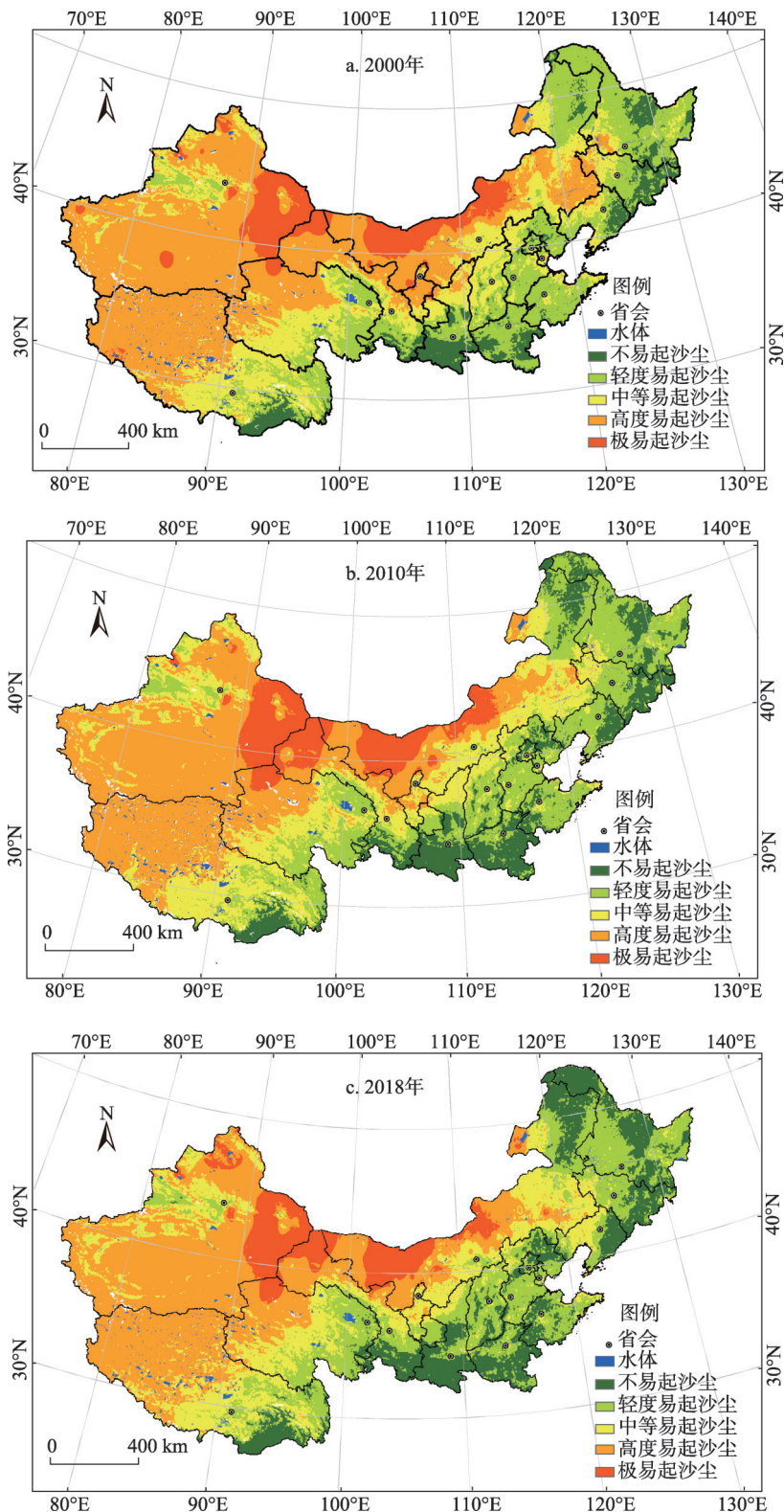


图2 2000年、2010年和2018年我国北方14省(区)土地沙化敏感性空间分布格局

Fig. 2 Spatial pattern of land desertification sensitivity in 14 provincial-level regions of Northern China in 2000, 2010 and 2018

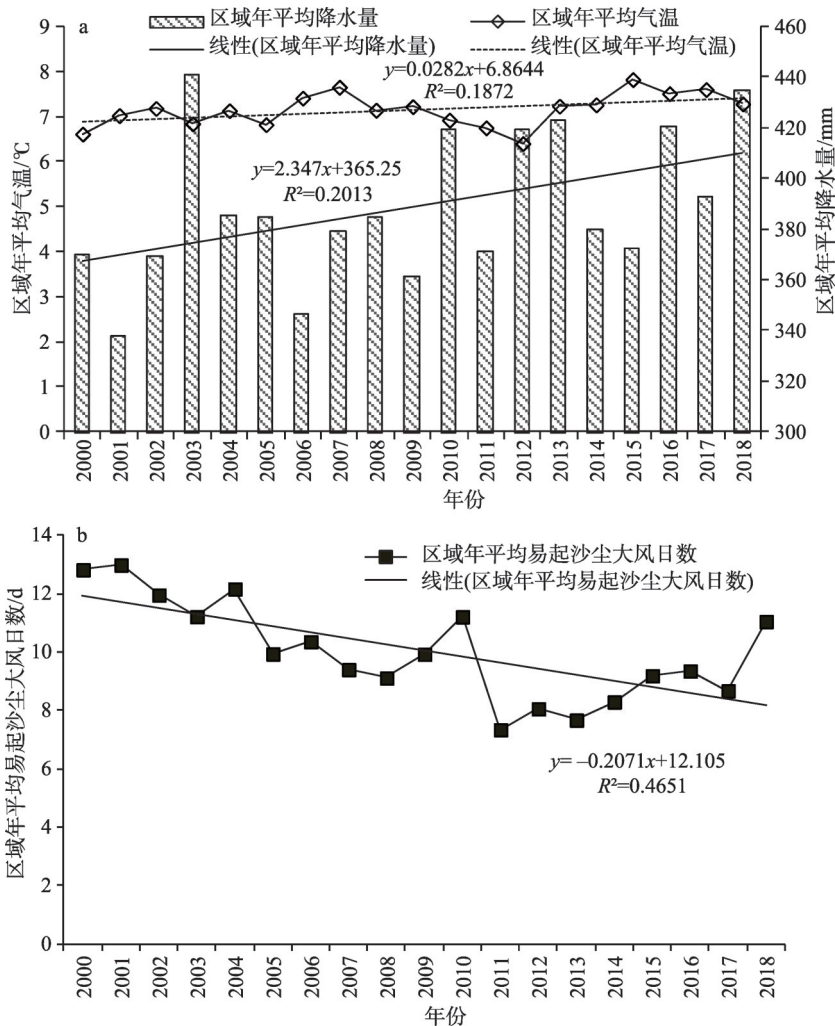


图3 2000—2018年中国北方14省(区)区域年平均气温、年降水量和年易起沙尘大风日数变化趋势

Fig. 3 Rate of change of annual mean temperature, precipitation and strong wind days in 14 provincial-level regions of Northern China from 2000 to 2018

周边区域极易起沙尘和高度易起沙尘的土地面积明显减小, 土地起沙程度减弱; 植被覆盖度的增加和大风日数的减少是这种变化的重要原因。

3.2 讨论

(1) 研究表明, 2000年以来整个北方地区气候条件利于植被恢复生长, 加之一系列生态建设工程的实施, 有效地提高了植被覆盖度, 降低了风沙侵蚀, 研究区域土地沙化的趋势得到遏制, 尤其是分布在内蒙古、宁夏、河北北部等地的毛乌素沙地、科尔沁沙地、浑善达克沙地及其周边区域土地沙化属高敏感等级的面积明显减少, 生态环境得到改善, 这与已有的研究结论是一致的。第五次全国荒漠化和沙化监测结果表明, 截至2014年中国浑善达克沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地和库布其沙漠等在内的东部沙区植被盖度增加了8.3%, 土地荒漠化和沙化状况呈现出由极重度向轻度转变的良好趋势^[5]。康文平等^[20]也曾指出, 2000—2014年内蒙古中西部地区的沙漠化程度与面积总体上呈减轻

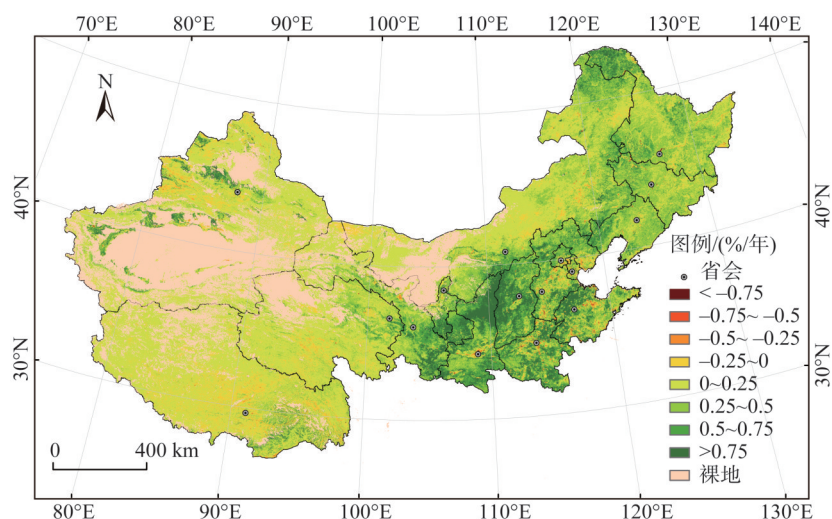


图4 2000—2018年中国北方14省(区)植被覆盖度变化趋势百分率

Fig. 4 Rate of change trend of vegetation coverage in 14 provincial-level regions of Northern China from 2000 to 2018

与减少趋势,尤其是毛乌素沙地及阴山北麓的农牧交错区等地区呈现相对稳定逆转的态势。段翰晨^[21]围绕科尔沁沙地研究结果也表明,2000年以来该区域重度和极重度沙化的土地面积呈波动性下降。

(2) 中国北方沙化地区是北方生态屏障的重要组成部分,虽然区域降水量的增加、生态工程的实施有效地降低了土地沙化的敏感性,但生态脆弱区沙化土地综合治理、生态修复与保护工作依然任重道远。有研究表明,抵御土地沙化最有效的办法是增加植被覆盖率^[22,23]。地表植被可以通过根系固定表层土壤、提高土壤抗风蚀的能力,还可以增加地表粗糙度削弱风的强度和携沙能力。因此,北方土地沙化属中高敏感等级的区域,尤其是受人类活动影响较大的生态脆弱区,应继续坚持“保护优先、科学治理、适度利用”的原则,重点发展耐旱灌木,着力恢复原生植被,特别是生态效益与经济效益兼优的特色林果业^[24],增强退耕还林还草的针对性和有效性;同时,建立一套完善的政策体系,推进重点生态工程建设,建立和巩固以林草植被为主体的沙区绿色生态屏障,提高北方地区的生态承载能力。

(3) 土壤风蚀的过程非常复杂,影响因素繁多且相互制约^[13]。本研究选择植被覆盖度、湿润指数、大风日数、坡度和土壤表层砂粒含量五个因子构建土地沙化敏感性综合评估模型,并利用层次分析法确定了不同评价指标的权重。有研究表明,不同坡向在不同风向的影响下存在风蚀差异。不同的土地利用方式、放牧制度等人为影响因素下,土壤风蚀也表现出较大的差异性^[25,26]。因此,模型参数选取和分级标准都会给评估结果的精确性带来一定的影响,针对土地沙化敏感性的研究还应充分考虑人类活动对生态系统造成的干扰,这样得出的结论更加客观真实,这将在今后的工作中进一步研究和探讨。

参考文献(References):

- [1] 王涛. 中国沙漠与沙漠化. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003: 13-16. [WANG T. Deserts and Aeolian Desertification in China. Shijiazhuang: Science & Technology Press, 2003: 13-16.]
- [2] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化. 北京: 中国科学出版社, 1994: 18-20. [ZHU Z D, CHEN G T. Sandy Desertification of Land in China. Beijing: Science Press, 1994: 18-20.]
- [3] 姜英, 扬联安, 孙景梅, 等. 中国沙化土地动态变化分析. 水土保持通报, 2006, 26(5): 62-64. [JIANG Y, YANG L A, SUN J M, et al. Analysis of dynamic changes in deserted lands of China. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(5): 62-64.]
- [4] 赵文龙, 傅筱林. 甘肃省河西地区沙漠化土地发展趋势及治理措施. 内蒙古林业调查设计, 2003, 26(s1): 17-20. [ZHAO W L, FU X L. Development trend and control measures of desertification land in Hexi area of Gansu province. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2003, 26(s1): 17-20.]
- [5] 屠志方, 李梦先, 孙涛. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析. 林业资源管理, 2016, 1: 1-5. [TU Z F, LI M X, SUN T. The status and trend analysis of desertification and sandification. Forest Resources Management, 2016, 1: 1-5.]
- [6] 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 2001. [DING Y H, WANG S R. Introduction to Climate Ecology and Environment in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 2001.]
- [7] 周欢水, 申建军, 姜英, 等. 中国西部沙漠化的分布、动态及其对生态环境建设的影响. 中国沙漠, 2002, 22(2): 112-117. [ZHOU H S, SHEN J J, JIANG Y, et al. Desertification distribution, dynamic and influence on the ecological environment in Western China. Journal of Desert Research, 2002, 22(2): 112-117.]
- [8] 任朝霞, 杨达源. 近50 a西北干旱区气候变化对农业的影响. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 48-53. [REN C X, YANG D Y. Impacts of climate change on agriculture in the arid region of Northwest China in recent 50 years. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(8): 48-53.]
- [9] 任朝霞, 杨达源. 近50 a西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 91-95. [REN C X, YANG D Y. Climate change and surface runoff change impact on desertification in the arid area of Northwest China in recent 50 years. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(4): 91-95.]
- [10] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12. [OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 9-12.]
- [11] 刘康, 徐卫华, 欧阳志云, 等. 基于GIS的甘肃省土地沙漠化敏感性评价. 水土保持通报, 2002, 22(5): 29-35. [LIU K, XU W H, OUYANG Z Y, et al. GIS-based assessment on sensitivity to land desertification in Gansu province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(5): 29-35.]
- [12] 冯宇, 王文杰, 刘军会, 等. 呼伦贝尔草原生态功能区防风固沙功能重要性主要影响因子时空变化特征. 环境工程技术学报, 2013, 3(3): 220-230. [FENG Y, WANG W J, LIU J H, et al. Spatial and temporal variation of main impact factors and importance of wind break and sand-fixing function in Hulun Buir grassland eco-function area. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(3): 220-230.]
- [13] 赵明月, 赵文武, 靳婷, 等. 青海湖流域土地沙漠化敏感性评价. 中国农学通报, 2012, 28(32): 237-242. [ZHAO M Y, ZHAO W W, JIN T, et al. Land desertification sensitivity evaluation in Qinghai Lake Basin. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 237-242.]
- [14] 王小军, 陈翔舜, 魏金平, 等. 甘肃省2004—2009年土地沙漠化时空变化分析. 中国沙漠, 2013, 33(1): 33-37. [WANG X J, CHEN X S, WEI J P, et al. Spatial and temporal changes of Aeolian desertification land from 2004 to 2009 in Gansu province, China. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 33-37.]
- [15] 王跃辉, 张林波, 郭杨, 等. 中国六省土地沙漠化敏感性时空格局与趋势分析. 水土保持研究, 2014, 21(5): 132-143. [WANG Y H, ZHANG L B, GUO Y, et al. Analysis of spatiotemporal pattern and tendency of land desertification sensitivity in six province of China. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 132-143.]
- [16] 申陆, 田美荣, 高吉喜, 等. 浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力. 应用生态学报, 2016, 27(1): 73-82. [SHEN L, TIAN M R, GAO J X, et al. Spatio-temporal change of sand-fixing function and its driv-

- ing forces in desertification control ecological function area of Hunshandake, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 73-82.]
- [17] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 中国生态环境敏感区评价. *自然资源学报*, 2015, 30(10): 1607-1616. [LIU J H, GAO J X, MA S, et al. Evaluation of ecological sensitivity in china. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(10): 1607-1616.]
- [18] 刘宇峰, 原志华, 吴林, 等. 基于湿润指数的近55年安康地表干湿变化趋势及周期研究. *自然灾害学报*, 2016, 25(3): 11-21. [LIU Y F, YUAN Z H, WU L, et al. Analysis of dry-wet condition and its cycles in Ankang of Shanxi province in recent 55 years based on surface humidity index. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(3): 11-21.]
- [19] 贺晶, 吴新宏, 杨婷婷, 等. 基于临界起沙风速的草地防风固沙功能研究. *中国草地学报*, 2013, 35(5): 103-107. [HE J, WU X H, YANG T T, et al. Research on sand-fixing function of grassland based on threshold wind velocity. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(5): 103-107.]
- [20] 康文平, 刘树林, 段翰晨. 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. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 307-318. [KANG W P, LIU S L, DUAN H C. 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. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(2): 307-318.]
- [21] 段翰晨. 基于多源遥感数据的科尔沁沙地沙漠化遥感监测. 北京: 中国科学院大学, 2013. [DUAN H C. Remote sensing monitoring of desertification in Horqin sandy land based on multi-source remote sensing data. Beijing: Chinese Academy of Sciences University, 2013.]
- [22] 夏广锋, 周昊, 朱悦, 等. 辽宁省沙化土地现状及防治措施. *内蒙古林业调查设计*, 2008, 31(1): 17-20. [XIA G F, ZHOU H, ZHU Y, et al. Status and prevention countermeasures of land desertification in Liaoning province. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2008, 31(1): 17-20.]
- [23] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 草地覆盖度变化对生态系统防风固沙服务的影响分析: 以内蒙古典型草原区为例. *地球信息科学学报*, 2014, 16(3): 426-434. [GONG G L, LIU J Y, SHAO Q Q. Effects of vegetation coverage change on soil conservation service of typical steppe in Inner Mongolia. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(3): 426-434.]
- [24] 唐夫凯, 齐丹卉, 卢琦, 等. 中国西北地区农林复合经营的保护与发展. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1429-1439. [TANG F K, QI D H, LU Q, et al. Strategies of conservation and development of agroforestry ecosystem in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1429-1439.]
- [25] 何文清, 赵彩霞, 高旺盛, 等. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究: 以内蒙古武川县为例. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 88-92. [HE W Q, ZHAO C X, GAO W S, et al. Main affecting factors of soil wind erosion under different land use patterns: A case study in Wuchuan county, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 88-92.]
- [26] 周尧治, 王旭, 杨佳霞, 等. 不同利用方式对草甸草原抗风蚀能力的影响. *环境科学*, 2008, 29(5): 1394-1399. [ZHOU Y Z, WANG X, YANG J X, et al. Influences of land using patterns on the anti-wind erosion of meadow grassland. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1394-1399.]

Spatio-temporal change of land desertification sensitivity in Northern China from 2000 to 2018 based on MODIS-NDVI

XU Ling-ling, YAN Hao, QIAN Shuan

(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Analysis of land desertification sensitivity is an important part of the wind break and sand-fixation ecological function assessment. The spatial distribution pattern and dynamic change of land desertification sensitivity in 14 provincial-level regions of Northern China from 2000 to 2018 were evaluated with the vegetation coverage, moisture index, days of strong wind, slope and sand content in surface soil as evaluation indexes. Five classes of land desertification sensitivity ranging from extreme to low were generated, namely extreme sensitivity zone and high sensitivity zone (high-sensitive desertification grade), moderate sensitivity zone (moderate-sensitive desertification grade), low sensitivity zone and non-sensitivity zone (low-sensitive desertification grade). Results showed that the land area of high-sensitive desertification grade decreased from 48.1% to 40.4% with a decline of 0.4% per year, and the land area of low-sensitive desertification grade increased from 30.3% in 2000 to 38.8% in 2018, showing the tendency of transition from high-sensitive desertification grade to middle and low-sensitive desertification grade in Northern China. The spatial distribution pattern of land desertification sensitivity in 2000, 2010 and 2018 showed that area of high-sensitive desertification grade was mainly distributed in the desert aggregation zone and its adjacent areas in the western and Northern China, with low vegetation coverage, and dry and windy climate; area of low-sensitive desertification grade was mainly distributed in Da and Xiao Hinggan Mountains, Changbai Mountains and Qinling Mountains with high vegetation coverage and relatively humid climate; area of moderate-sensitive desertification grade was located in the buffer areas of the two. Compared with 2000, the sensitivity of land desertification in the desert aggregation zone in the western and Northern China remained stable, however, the land area of high-sensitive desertification grade in Mu Us sandy land, Horqin sandy land and Hunshandake sandy land, which were located in Inner Mongolia, Ningxia and their surrounding area, decreased significantly in 2018. The remarkable increase of vegetation coverage caused by the temperature rising, precipitation increasing and a series of ecological protection engineering as well as the decrease of strong wind days were important factors for this change.

Keywords: land desertification; sensitivity; spatio-temporal pattern change; Northern China