

# 1981—2010 年中国北方风蚀气候侵蚀力 演变与植被动态响应

李达净<sup>1,2</sup>, 许端阳<sup>1</sup>, 丁雪<sup>3</sup>, 王子玉<sup>4</sup>, 宋阿琳<sup>5</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;

2. 华中师范大学 农村改革发展协同创新中心, 武汉 430079; 3. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030;

4. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 5. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 风蚀气候侵蚀力演变是影响植被生长的重要因素, 基于 GIMMS NDVI3gV1.0 数据以及气候数据, 并结合多情景分析法、敏感性分析法, 分析了 1981—2010 年中国北方风蚀气候侵蚀力演变及其对植被变化的影响。结果表明: (1) 1981—2010 年, 风蚀气候因子指数多介于 10~100, 均值为 29.4, 侵蚀力水平一般。其基本特征是由东至西逐渐减弱, 由南至北逐渐减弱。(2) 1981—2010 年, 中国北方风蚀气候侵蚀力整体上呈下降趋势, 其变化主要受风速影响, 二者相关系数高达 0.95。(3) 植被动态对风蚀气候侵蚀力演变的响应具有典型的空异质性, 多数沙区表现为风蚀气候侵蚀力减少导致植被增加。(4) 不同沙区植被变化对风蚀气候侵蚀力演变的响应程度不同, 河套平原、塔里木盆地等沙区植被动态对风蚀气候侵蚀力演变较为敏感, 伊犁盆地、乌兰察布以及阿拉善高原等沙区则敏感性较小。

**关键词:** 风蚀气候侵蚀力; 植被变化; 时空演变

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0015-06

## Changes of Wind Erosion Climatic Erosivity and Vegetation Dynamics Response in Northern China from 1981 to 2010

LI Dajing<sup>1,2</sup>, XU Duanyang<sup>1</sup>, DING Xue<sup>3</sup>, WANG Ziyu<sup>4</sup>, SONG Alin<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural

Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Collaborative Innovation Center of Rural Reform and

Development, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 3. College of Resources and Environment,

Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. College of Forestry, Beijing Forestry University,

Beijing 100083, China; 5. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The evolution of wind erosion climatic erosivity is the key to vegetation growth. Based on GIMMS NDVI3g V1.0 data, climate data, this study analyzed the change of wind erosion climatic erosivity and its impacts on vegetation growth in northern China from 1981 to 2010. The main method used in this study was the multiple scenario analysis method and the sensitivity analysis. The results show that: (1) during the period of 1981—2010, the wind erosion climatic factor index is between 10~100, the mean value is 29.4, the level of erosivity is general; the basic characteristic is gradually weakening from east to west, and gradually weakening from south to north; (2) in 1981—2010, the wind erosion climatic erosivity showed tendency to descend in northern China; The change was mainly affected by wind speed, and the correlation coefficient between the two was up to 0.95; (3) changes of wind erosion climatic erosivity had spatial heterogeneity to vegetation changes; most of the sandy areas were characterized by the significant decrease of wind erosion climatic factor index, which led to the vegetation increase; (4) the response degree of vegetation dynamics to the changes of wind erosion climatic erosivity was obviously different; vegetation dynamics were more sensitive to wind erosion climatic erosivity in Hetao Plain and Tarim Basin, etc., and the sensitivities of Yili basin, Wulanchabu and Alashan Plateau were relatively low.

**Keywords:** wind erosion climatic erosivity; vegetation changes; space-time evolution

土壤风蚀是在以风力为主的外营力作用下<sup>[1]</sup>,土壤颗粒发生的脱离地表、搬运和沉积的动力学过程,也是我国北方干旱、半干旱及部分半湿润地区土地退化的重要影响因素<sup>[2-3]</sup>。我国是受土壤风蚀影响最为严重的国家之一。据国家林业局第五次荒漠化调查统计,截至 2014 年底,风蚀荒漠化(沙漠化)土地面积为 182.63 km<sup>2</sup>,占全国荒漠化总面积的 69.93%<sup>[4]</sup>。土壤风蚀不仅引起本区域土壤层的剥蚀、土壤粗化及土壤肥力降低,而且影响到植被生长并造成大面积的风沙天气,严重威胁着农业、工业、交通和水电工程等方面的安全,不利于风蚀区的人体健康和社会经济持续稳定发展。

多数陆地植物以土壤为生长基质,土壤风蚀与植被生长有着密切的关系<sup>[5-10]</sup>。目前,国内外关于风蚀与植被变化的研究取得了较大进展,实现了从定性描述到半定量再到定量研究的发展。20 世纪 50 年代以前,国内外对于土壤风蚀与植被的关系认识较浅,研究方法处于定性描述的阶段。20 世纪 50—70 年代,相关研究进入半定量研究阶段,如 Chepil 等<sup>[11]</sup>提出风蚀会带走大量富含植被生长所需营养的细颗粒物,对植被生长造成潜在影响;同时发现直立的小麦残茬地上的风蚀量仅为裸地风蚀量的 17.5%,表明残茬覆盖可以减少风蚀的危害。20 世纪 80 年代—20 世纪末,风蚀与植被关系的研究向定量风洞试验与数理分析的方向转变,如 Buckley<sup>[12]</sup>通过风洞试验得到区域风蚀、风积强度的变化会影响干旱、半干旱地区植被生长;董治宝等<sup>[13]</sup>通过风洞试验发现在干旱、半干旱地区保持一定临界指标的植被盖度对于控制土壤风蚀的发生与发展具有重要意义。21 世纪以来,随着 3S 技术、风洞模拟试验以及野外长期定位监测等研究方法的不断进步,风蚀与植被的关系研究正式进入定量研究阶段。如 Wang 等<sup>[14]</sup>以青藏高原为研究区进行风洞试验,结果表明在弱风沙活动下土壤中氮、碳、磷等营养物质的损失量分别为 100,4 880,120 kg/km<sup>2</sup>,远低于强风沙活动的 2 540,52 340,910 kg/km<sup>2</sup>,有利于植被生长。然而,目前相关研究主要集中于植被对土壤风蚀的影响,而对长时间序列风蚀对植被变化影响的研究仍然不足,特别是在植被变化对风蚀气候侵蚀力演变响应的区域差异以及敏感性方面尚缺乏系统研究。因此,有必要针对我国北方干旱、半干旱及部分半湿润地区风蚀气候侵蚀力演变与植被变化的响应展开研究,这对于理解植被的发育机理,改善风蚀环境具有重要意义。

中国北方地区生态环境脆弱,是我国典型风蚀区;同时又是连接丝绸之路经济带和中俄蒙经济走廊的重要通道,是我国向北开放的前沿阵地,具有重要的国土安全和国防战略地位。基于此,本文以中国北

方地区为研究区域,基于栅格尺度,分析 1981—2010 年该区域的风蚀气候侵蚀力演变情况;研究风蚀气候侵蚀力演变对植被变化的影响,旨在为中国北方风蚀防治工作的开展提供参考,以期为中国北方沙区生态安全屏障建设提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

中国北方地区主要位于内蒙古、新疆、青海、宁夏、甘肃、河北、山西、陕西、四川等省份的干旱、半干旱以及部分半湿润气候区,地理位置介于 31°—51°N, 76°—125°E,呈弧形带状分布。全区总面积为 3.02×10<sup>8</sup> km<sup>2</sup>,占全国总面积的 31.46%;平均海拔 1 720 m,地势较高;年均降雨量 200 mm,自东向西呈递减趋势,降雨量少而不匀;平均气温 6.9℃,四季分明,气温偏低,且东西差异显著;平均年日照时数 2 930 h,日照充足,光能资源丰富;春秋风大,年均风速 2.5 m/s;土壤以栗钙土、棕钙土、风沙土等为主。受气温、降雨等气候因素以及人类活动的影响,本区土壤风蚀危害严峻,植被覆盖度低,土地退化较为严重。为了便于统计和分析对比,结合中国北方的地理环境,并参考以往研究<sup>[15]</sup>,将研究区划分为图 1 所示的 20 个沙区[涉及中国北方 9 个省份、222 个县(旗)]。

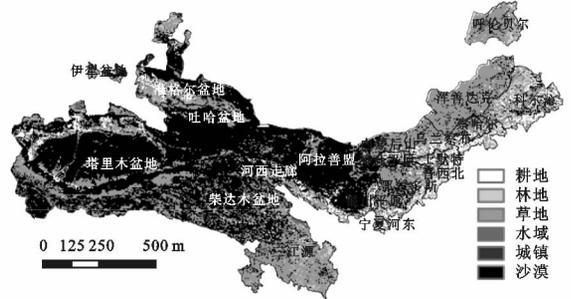


图 1 2010 年中国北方土地利用/覆被情况

### 1.2 数据收集与处理

本研究所使用的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)为 GIMMS NDVI3g V1.0 数据,来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)全球监测与模型研究组(Global Inventor Modeling and Monitoring group, GIMMS)发布的最新版全球植被指数变化数据(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms>),该数据的空间分辨率为 0.0833×0.0833 度,时间分辨率为半月,时间范围为 1981 年 7 月—2015 年 12 月。本研究使用的气象数据为国家气象信息中心下载的国家台站的风速、降雨、温度等月值数据,采用反距离权重法(IDW)进行插值。为便于统计分析,同时考虑到所有数据中的最低分辨率,本研究将所有数据统一处理为分辨率为 8 km×8 km 的栅格数据。

### 1.3 方法

1.3.1 风蚀气候侵蚀力的计算方法 本文采用风蚀气候因子指数(以下简称 C 值)作为风蚀气候侵蚀力的代用指标,该指标主要由风速、降雨、蒸散等因素决定。参考以往研究<sup>[16]</sup>,本文利用联合国粮农组织(FAO)修正的计算公式计算 C 值(公式 1),该公式计算方便又具有较高的准确性,适合分析我国北方沙区风蚀气候侵蚀力的基本特征。

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} \bar{u}^3 \left( \frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right) d \quad (1)$$

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2(1 - r_i) \quad (2)$$

式中: $\bar{u}$  为 2 m 高处的月均风速(m/s); $ETP_i$  为月潜在蒸发量(mm); $P_i$  为月降水量(mm); $d$  为月天数; $T_i$  为月平均气温; $r_i$  为月平均相对湿度。

1.3.2 风蚀气候侵蚀力演变对植被动态影响的识别 本研究采用多情景分析的方法识别 C 值变化对植被动态的影响。具体分析方法如下:(1) 以年度 NDVI 总和(以下仍简称“NDVI”)作为反映植被盖度与生产力的代用指标,在栅格尺度上模拟 1981—2010 年 NDVI 值与 C 值的变化趋势(公式 3,4),并通过显著性检验( $p < 0.05$ ),判断 C 值与 NDVI 值是否发生显著变化。(2) 分析 C 值变化与 NDVI 值变化的相关性(公式 5),并对相关系数进行显著性检验

表 1 风蚀气候侵蚀力演变对植被变化影响的识别方法

情景	C 值变化趋势	NDVI 变化趋势	C 值与 NDVI 相关关系	情景分析
1	显著减少	显著增加	负相关	C 值显著减少引起植被增加
2	显著减少	显著减少	正相关	C 值显著减少引起植被减少
3	显著增加	显著增加	正相关	C 值显著增加引起植被增加
4	显著增加	显著减少	负相关	C 值显著增加引起植被减少

1.3.3 敏感性分析 敏感性系数提供了不明确因素变动率与评价指标变动率之间的比例,本研究引入敏感度系数(SAF)分析植被变化对风蚀气候侵蚀力演变的敏感程度,计算公式如下:

$$SAF = \frac{\Delta NDVI / NDVI}{\Delta C / C} \quad (6)$$

式中: $\Delta NDVI / NDVI$  代表 NDVI 值的变化率; $\Delta C / C$  代表 C 值的变化率。 $SAF > 0$  表示 NDVI 值对 C 值正向敏感; $SAF < 0$  表示 NDVI 值对 C 值反向敏感。当  $|SAF| > 1$  时,则认为 C 值是敏感参数;当  $|SAF| < 0.1$  时,则认为 C 值是不敏感参数;当  $0.1 < |SAF| < 1$  时,则认为 C 值属于一般敏感参数。 $|SAF|$  越大,表明植被变化对风蚀气候侵蚀力演变越敏感;反之则越不敏感。

## 2 结果与分析

### 2.1 1981—2010 年中国北方风蚀气候侵蚀力的基本特征

利用联合国粮农组织(FAO)修正的公式计算出

( $p < 0.05$ )。(3) 针对已经识别出由风蚀气候侵蚀力演变引起植被变化的区域,综合 C 值变化趋势及其与 NDVI 变化的相关性,通过多情景分析,评估 C 值变化对植被变化的影响。例如,对于一个已经判列为 C 值显著减少且 NDVI 值显著增加的区域,若 C 值与 NDVI 值呈显著负相关,则认为该区域中 C 值显著减少对植被增加有显著贡献(表 1)。

$$\hat{Y}_t = b_0 + b_1 t \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{n \sum t Y - \sum t \sum Y}{n \sum t^2 - (\sum t)^2} \quad (4)$$

式中: $\hat{Y}_t$  为时间序列  $Y_t$  的预测值; $t$  为时间标号; $b_0$  代表趋势线在 Y 轴上的截距; $b_1$  是趋势线的斜率; $n$  为监测累计年数; $Y$  为每年对应的 NDVI 值或 C 值;其中,若  $b_1 > 0$  表明 NDVI 值或 C 值呈增加的趋势, $b_1 < 0$  表明呈减少的趋势。

$$r_{xy} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: $r_{xy}$  为 C 值与 NDVI 值的相关系数; $x$  与  $y$  分别为 1981—2010 年各年份的 C 值与 NDVI 值; $\bar{x}$  与  $\bar{y}$  分别为 30 年间 C 值与 NDVI 值的平均值。若  $r_{xy} > 0$ ,则表示正相关,即 C 值与 NDVI 值同向变化;若  $r_{xy} < 0$ ,表示负相关,两者反向变化。

C 值,得出 1981—2010 年 30 a 平均 C 值的空间分布(图 2)。结果表明,我国北方风蚀气候侵蚀力具有典型的空异质性,C 值基本特征为由东至西逐渐减弱,由南至北逐渐减弱。30 年 C 值均值为 29.4,多介于 10~100,面积占中国北方沙区的 74.49%,侵蚀力水平一般。C 值小于 10 的面积为  $7.18 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占中国北方沙区的 23.63%,主要分布在塔里木盆地西部、三江源东南部等沙区。C 值大于 100 的面积为 5.70 万  $\text{km}^2$ ,占中国北方沙区的 1.87%,主要分布于研究区北部的吐哈盆地、准格尔盆地南部、河西走廊北部、阿拉善盟北部、浑沙达克西南部。

### 2.2 1981—2010 年中国北方风蚀气候侵蚀力的时空变化

1981—2010 年,中国北方沙区 C 值变化存在明显的空差异(图 3)。C 值显著减少的面积为  $2.17 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,占 C 值显著变化总面积的 88.00%,主要分布在伊犁盆地、准格尔盆地、柴达木盆地、三江源、

阿拉善盟东部、内蒙后山等 17 个沙区;其中,  $C$  值大于 100 的极重侵蚀力范围明显缩小, 从 1981 年的  $1.35 \times 10^5 \text{ km}^2$  减少至 2010 年的  $8.72 \text{ 万 km}^2$ , 主要分布在塔里木盆地与柴达木盆地交界处、准格尔盆地与吐哈盆地交界处、乌兰察布北部、察哈尔盆地西南部; 而  $C$  值小于 10 的侵蚀力范围则明显增加, 从 1981 年的  $4.06 \times 10^5 \text{ km}^2$  增加到 2010 年的  $7.43 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 增加了 1.83 倍, 主要分布在塔里木盆地西部、准格尔盆地北部以及呼伦贝尔草原东部等沙区。与此同时,  $C$  值显著增加的面积为  $2.96 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 主要分布在吐哈盆地、塔里木盆地西南部以及宁夏河东沙地; 其中, 吐哈盆地的

增长幅度最大, 该沙区  $C$  值大于 100 的极重侵蚀力范围扩张显著, 由 1981 年的  $1.39 \text{ 万 km}^2$  扩张至 2010 年的  $3.63 \text{ 万 km}^2$ , 增加了 2.61 倍。

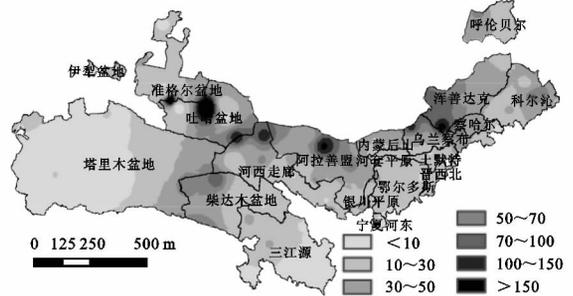


图 2 1981—2010 年多年平均风蚀气候因子指数分布

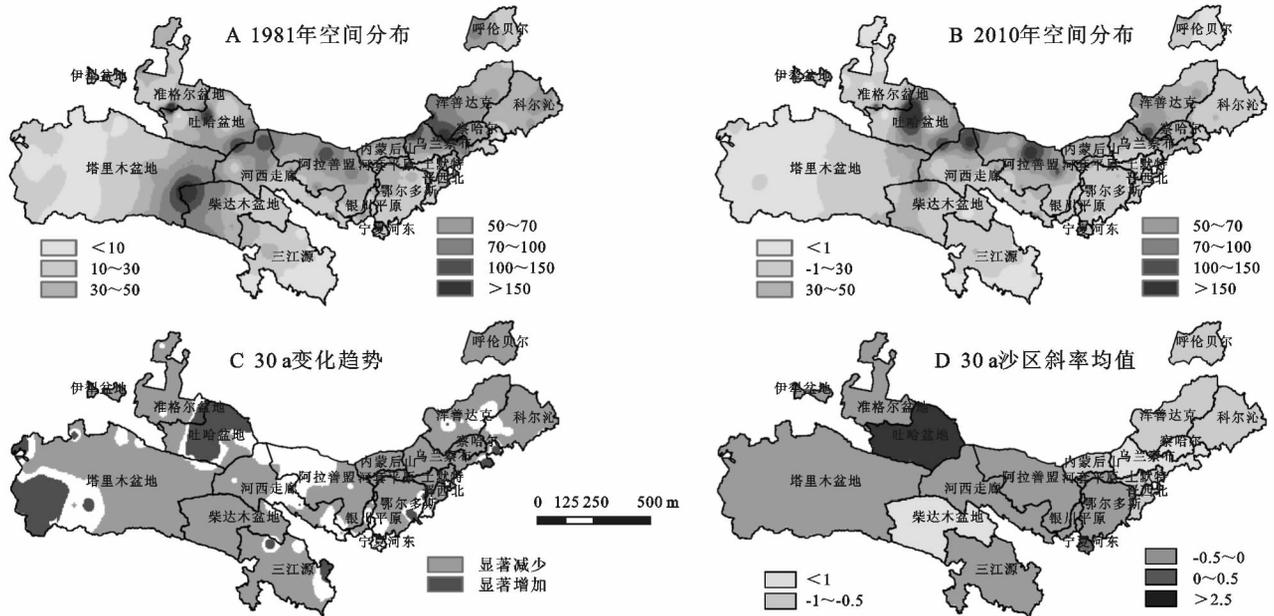


图 3 1981—2010 年中国北方风蚀气候因子指数变化空间分布

如图 4 所示, 通过比较 1981—2010 年中国北方  $C$  值变化趋势与风速、降雨、温度等气候因素的相关关系, 可以发现其与风速变化趋势基本吻合, 两者相关系数均值高达 0.95, 表明风速是影响  $C$  值演变的重要因子。30 年间, 中国北方的平均风速从 1981 年的  $2.83 \text{ m/s}$  降低至 2010 年的  $2.54 \text{ m/s}$ , 风

速的显著降低直接导致了北方地区  $C$  值总体上呈减少趋势。与此同时, 1981—2010 年吐哈盆地与塔里木盆地西南部的  $C$  值随风速的增加而增加, 其中吐哈盆地  $C$  值与风速的相关系数高达 0.98, 风速在 30 年间增加了  $0.48 \text{ m/s}$ , 是该区域  $C$  值显著增加的主要原因。

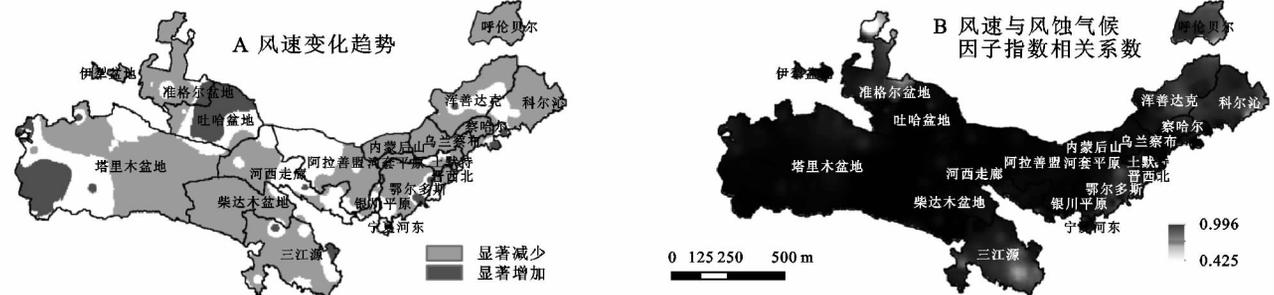


图 4 1981—2010 年中国北方风速变化趋势、风速与风蚀气候因子指数相关系数空间分布

### 2.3 风蚀气候侵蚀力演变与植被变化响应

通过计算 1981—2010 年  $C$  值与 NDVI 值的线性倾向率以及两者变化趋势的相关性, 运用多情景分

析方法, 得出 30 a 风蚀气候侵蚀力演变与植被变化的响应情况(表 2, 图 5)。结果表明, 风蚀气候侵蚀力演变与植被变化显著相关的面积为  $3.28 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,

占植被变化总面积的 22.25%。在中国北方干旱、半干旱地区, C 值主要受风速影响, 北方地区春季因风场强大为主要的风蚀季节, 但非风蚀季节植被更多的受降雨、温度以及人类活动的综合影响, 再加上植被变化对风力侵蚀在的气候变化的迟滞响应, 从而造成了年际尺度上 C 值与 NDVI 值相关程度并不是很高。

表 2 风蚀气候侵蚀力演变与植被变化响应

情景	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
C 值显著减少引起植被增加	$2.66 \times 10^5$	80.95
C 值显著减少引起植被减少	$4.20 \times 10^4$	12.81
C 值显著增加引起植被增加	$1.02 \times 10^4$	3.10
C 值显著增加引起植被减少	$1.03 \times 10^4$	3.14

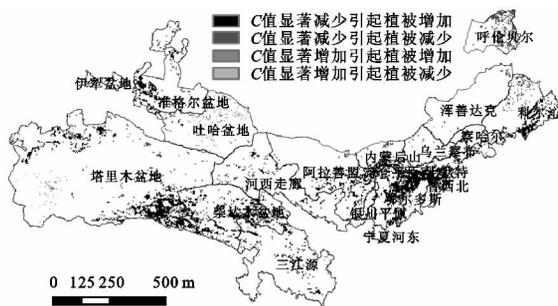


图 5 1981—2010 年风蚀气候侵蚀力演变与植被变化的响应情况空间分布

C 值显著减少对植被增加的影响较大, 作用面积为  $2.66 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, 占 C 值演变引起植被变化总面积的 80.95%, 主要作用在中国西北地区的伊犁盆地、塔里木盆地西北部与东南部、准格尔盆地西南部、柴达木盆地、河西走廊、银川平原、河套平原, 以及内蒙古中西部的阿拉善西南部、鄂尔多斯草原、土默特平原、晋西北以及科尔沁草原西部; 这些地区风蚀气候侵蚀力的影响更多地体现在与其他气候因素的交互效应, 如同期这些地区水热环境有明显改善, 降雨量从 1981 年的 216 mm 增加至 2010 年的 245 mm, 温度平均每 10 a 增加 0.38℃, 导致西部绿洲地区水资源供给的增加。与此同时, C 值显著增加引起植被减少的面积为 1.02 万 km<sup>2</sup>, 主要体现在吐哈盆地等沙区。此外, 部分区域出现风蚀气候侵蚀力演变与植被增加、减少不同步的现象。例如, 呼伦贝尔草原东部和科尔沁西北部的 C 值呈减少趋势, 侵蚀强度有所减弱, 但 NDVI 值却呈减少趋势; 而存在同样问题的区域(含 C 值显著增加引起植被增加)共占 15.91%, 这也表明植被变化并不完全是风蚀气候侵蚀力作用的产物, 还受到其他气候因子、人类活动以及其他政策因素的影响。例如低温会限制植被的生长, 因此塔里木盆地西南部即使侵蚀加剧, 但由于 30 年间温度升高了 1.5℃, 也会导致植被增加等。

## 2.4 植被变化对风蚀气候侵蚀力演变的敏感度分析

为进一步分析中国北方地区 C 值演变对植被的影响, 本文引入敏感度系数, 结果表明: 20 个沙区中 13 个沙区植被变化对 C 值演变具有一定的敏感性, 且不同沙区的敏感强度存在较大差异(表 3)。具体表现为, 13 个沙区中 11 个沙区表现为反向敏感, 即随 C 值的增加 NDVI 值减少或随 C 值的减少 NDVI 值增加; 2 个沙区表现为同向敏感, 即随 C 值的增加 NDVI 值随之增加或随 C 值的减少 NDVI 值随之减少。反向敏感中河套平原、塔里木盆地、宁夏河东沙地的植被变化对 C 值演变较为敏感, 敏感度分别为 -1.707, -1.489 和 -1.217; 柴达木盆地、晋西北地区、吐哈盆地、河西走廊、呼伦贝尔草原、三江源、鄂尔多斯草原、准格尔盆地等沙区的植被变化对 C 值演变表现为一般敏感, |SAF| 介于 0.1~1, 且敏感度依次降低。同向敏感中银川平原和察哈尔草原的植被变化对 C 值演变表现为一般敏感, 敏感度分别为 0.218, 0.215。而土默特平原、阿拉善高原、伊犁盆地、浑善达克沙地、内蒙古后山、科尔沁草原、乌兰察布区域的敏感度系数均在 0 附近徘徊, 植被变化对 C 值演变不敏感。

表 3 植被变化对风蚀气候侵蚀力的敏感度分析

沙区	NDVI 值 变化量	C 值 变化量	敏感度 系数(SAF)
河套平原	0.228	-10.769	-1.707
塔里木盆地	0.086	-12.802	-1.489
宁夏河东沙地	0.413	-1.847	-1.217
柴达木盆地	0.165	-32.489	-0.597
晋西北地区	0.550	-11.327	-0.571
吐哈盆地	-0.007	47.941	-0.476
河西走廊	0.116	-5.942	-0.322
呼伦贝尔草原	0.360	-29.049	-0.317
三江源	0.474	-2.946	-0.316
鄂尔多斯草原	0.325	-8.872	-0.209
准格尔盆地	0.186	-24.721	-0.175
土默特平原	0.016	-16.629	-0.058
阿拉善高原	0.044	-0.096	-0.056
伊犁盆地	-0.045	-7.578	-0.003
银川平原	0.252	-16.825	0.218
察哈尔草原	-0.223	-23.650	0.215
浑善达克沙地	-0.123	-20.467	0.085
内蒙古后山	-0.034	-15.185	0.081
科尔沁草原	-0.064	-23.759	0.068
乌兰察布	-0.086	-29.362	0.042

### 3 结论

(1) 近 30 a, 中国北方地区  $C$  值多介于 10~100, 均值为 29.4, 其基本特征是由东至西逐渐减弱, 由南至北逐渐减弱, 最大值出现在吐哈盆地。 $C$  值的空间分布特征揭示了风蚀防治的重点区域, 中国北方风蚀防治的重点在吐哈盆地、河西走廊、阿拉善盟高原等沙区; 其次为乌兰察布、察哈尔草原、浑善达克沙地、柴达木盆地等沙区。

(2) 30 年间, 中国北方地区  $C$  值显著减少的面积为  $2.17 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占  $C$  值显著变化总面积的 88.00%, 主要分布在伊犁盆地、准格尔盆地、柴达木盆地等 17 个沙区; 与此同时, 吐哈盆地、塔里木盆地西南部以及宁夏河东沙地的  $C$  值显著增加;  $C$  值的变化主要受风速影响, 二者相关系数高达 0.95。

(3)  $C$  值变化对植被动态的影响具有空间异质性, 鄂尔多斯草原、柴达木盆地、河套平原等沙区表现为  $C$  值显著减少引起植被增加; 呼伦贝尔、科尔沁草原西北部等沙区表现为  $C$  值显著减少引起植被减少; 吐哈盆地等沙区表现为  $C$  值显著增加引起植被增加; 塔里木盆地等沙区表现为  $C$  值显著增加引起植被减少。

(4) 植被变化对  $C$  值演变的敏感性差异显著, 其中河套平原、塔里木盆地、宁夏河东沙地的植被变化对  $C$  值演变表现为反向敏感; 银川平原和察哈尔草原等沙区的植被变化对  $C$  值演变表现为同向敏感; 伊犁盆地、乌兰察布以及阿拉善高原等沙区则敏感性较小。

#### 参考文献:

[1] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 875-889.

[2] 陈渭南. 蒙陕接壤地区土壤母质的风蚀试验研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 33-39.

[3] 杜鹏飞, 刘孝盈. 中国土壤风蚀速率实测研究述评[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 275-281.

[4] 国家林业局. 第五次全国沙漠化和沙化土地监测情况[N]. 中国林业网, 2015-12-29.

[5] McTainsh G H, Lynch A W, Tews E K. Climate controls upon dust storm occurrence in eastern Australia [J]. Journal of Arid Environment, 1998, 39: 457-466.

[6] Shi H D, Liu J Y, Zhuang D F, et al. Using the RBFN model and GIS technique to assess wind erosion hazard of Inner Mongolia, China [J]. Land Degradation & Development, 2007, 18: 413-422.

[7] Hoffmann C, Funk R, Reiche M, et al. Assessment of extreme wind erosion and its impacts in Inner Mongolia, China [J]. Aeolian Research, 2011, 3: 343-351.

[8] Field J P, Breshears D D, Whicker J J, et al. Sediment capture by vegetation patches: Implications for desertification and increased resource redistribution [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117 (G1).

[9] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation and eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(5): 499-510.

[10] Wang X M, Hua T, Lang L L, et al. Spatial differences of aeolian desertification responses to climate in arid Asia [J]. Global and Planetary Change, 2017, 148: 22-28.

[11] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control [J]. Advances in Agronomy, 1963, 15: 211-302.

[12] Buckley R. The effect of sparse vegetation cover on the transport of dune sand by wind [J]. Nature, 1987, 325: 426-428.

[13] 董治宝, 陈渭南, 李振山, 等. 植被对土壤风蚀影响作用的室验研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 1-8.

[14] Wang X M, Lang L L, Yan P, et al. Aeolian processes and their effect on sandy desertification of the Qinghai-Tibet Plateau: A wind tunnel experiment [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 158: 67-75.

[15] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题: 3. 沙漠化研究和防治的重点区域 [J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 1-9.

[16] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析 [J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7.