

刘俊壕,周海盛,郭群.中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响[J].中国沙漠,2023,43(5):204-213.

# 中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响

刘俊壕<sup>1a,2</sup>,周海盛<sup>1a,2</sup>,郭群<sup>1ab,3</sup>

(1.中国科学院地理科学与资源研究所 a.生态系统网络观测与模拟重点实验室, b.国家生态科学数据中心,北京 100101; 2.华南师范大学 地理科学学院,广东 广州 510631; 3.中国科学院大学 资源与环境学院,北京 100190)

**摘要:**中国北方干旱半干旱区是全球变绿的重要贡献者,生态工程的实施是该区植被恢复的重要原因,作为中国北方重要的生态工程,沙漠化治理对植被年际变异的贡献有待研究。基于1982—2021年长时序植被指数(NDVI)、气象和沙漠化分布等数据,分析了北方干旱半干旱区不同自然单元NDVI时空动态变化及其影响因素在沙漠化区与邻近地带植被对照区的差异。结果显示:(1)1975—2020年研究区域沙漠化总面积先增加后降低,2000年沙漠化面积最大,表明2000年后沙漠化治理成效显著。(2)1982—2021年研究区内44.5%的面积NDVI显著增加,5.8%的面积显著减少,即研究区内植被恢复为主,主要分布在河套平原、科尔沁沙地、库布齐沙漠、毛乌素沙地、新疆南部和准噶尔盆地及天山。沙漠化区显著增加面积比例(45.7%)略高于邻近地带植被对照区(41.7%)。(3)1982—2021年沙漠化区年变绿速率(0.0055)显著大于邻近地带植被对照区(0.0036),该结果在2000年前后存在差异,2000年前沙漠化区年变绿速率(0.0043)显著小于邻近地带植被对照区(0.0056)。2000年后与整体结论一致,沙漠化区年变绿速率(0.0073)显著大于邻近地带植被对照区(0.0067)。(4)降水和空气比湿等水分因素是沙漠化区及邻近地带植被对照区NDVI变化的主导因素,个别自然单元风速影响因素更大,且NDVI与风速相关性较高。沙漠化区NDVI与水分的相关性较邻近地带植被区低,风速则相反。研究结果将为沙漠化治理成效的评估和未来沙漠化治理措施的改进提供科学依据。

**关键词:**中国北方干旱区;沙漠化治理;变绿;年际变异

**文章编号:** 1000-694X(2023)05-204-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.000112

**中图分类号:** N8

**文献标志码:** A

## 0 引言

长时间序列遥感植被指数分析显示,近几十年来全球大部分地区植被指数均呈现逐年增加的趋势,即变绿,其中中国和印度是全球变绿的主要贡献者<sup>[1]</sup>。植被变绿是指植被覆盖度或生物量的增加,意味着固碳潜力的增加,因此,在中国力争实现“双碳”目标的背景下,植被变绿研究变得尤为重要<sup>[2]</sup>。中国北方干旱半干旱区是植被变绿最显著的地区之一<sup>[3]</sup>,该区域同时是“三北防护林”“退牧还草”等诸多生态工程实施的区域,因此研究认为生态工程的实施是变绿的主要原因<sup>[4-6]</sup>。而定量的分析多采用模型拆分<sup>[7]</sup>或气候因子的回归残差<sup>[8]</sup>等

方法量化人类活动的影响,如利用残差法分析发现人为活动主导黄土高原20%区域的植被变绿<sup>[8]</sup>。这些定性或定量的研究大多都是间接地分析人类活动的贡献,而人类活动也不完全等同于生态工程,因此迫切需要直接地定量分析生态工程对中国北方植被多年变化趋势的影响及其影响因素,以便有效评估过去生态工程的实施效果,并进一步为未来生态工程措施的改进提供科学依据。

沙漠化治理是中国北方干旱半干旱区的重要生态工程。中国的防沙治沙工作已有70多年的历史,沙漠化防治工作成效显著。据第六次全国荒漠化和沙化调查结果显示<sup>[9]</sup>,2019年中国沙漠化面积

收稿日期:2023-06-22; 改回日期:2023-08-23

资助项目:国家自然科学基金项目(3217155,31961143022);美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23060205)

作者简介:刘俊壕(2001—),男,广东梅州人,地理信息科学专业本科生。E-mail: 20192633055@m.scnu.edu.cn.

通信作者:郭群(E-mail: guoq@igsrr.ac.cn)

与2014年相比净减少33 352 km<sup>2</sup>。因此,衡量沙漠化治理对植被变绿的贡献将是重要的研究内容。同时,中国共有八大沙地,除此之外,还包括如锡林郭勒草原等区域的一些小型沙地<sup>[10]</sup>,从自然单元的角度而不是行政区域的角度开展沙漠化治理更符合“山水林田湖草沙冰”生命共同体一体化保护和系统治理的要求<sup>[11]</sup>,因此衡量不同自然单元沙漠化治理对植被变绿的贡献将有利于评估过去沙漠化治理的成效,并为后续沙漠化治理提供经验和科学支持。沙漠化治理对植被变绿的影响复杂,既有降水、温度等气候要素的影响<sup>[12-13]</sup>,还有沙漠化治理后长时间内人工管理措施的影响。以往研究中常将植被指数(NDVI)和气候要素拟合的残差作为人为要素的贡献<sup>[4,14-15]</sup>,由于每项研究不可能考虑所有的环境要素,且人类活动也不仅仅只有实施生态工程一项,因此残差法存在高估或低估生态工程贡献的可能性<sup>[16]</sup>。有必要以沙漠化区邻近地带的植被作为对照,系统分析两个区域内植被年际变异及其影响因素的差异,一方面可以更好地量化沙漠化治理对植被变绿的贡献,另一方面沙漠化区和邻近地带植被对照区植被年际变异影响因素的差异将有利于评估沙漠化治理后期管理强度降低和未來气候变化等情况下植被恢复的可持续性。

本研究以中国北方沙漠化区及其邻近地带植被对照区为研究区,基于长期的遥感NDVI和气象数据,旨在回答以下问题:①沙漠化区和邻近地带植被对照区NDVI多年变化趋势以及变化速率有何差异?②影响沙漠化区和邻近地带植被对照区NDVI年际变异的气象因子有何差异?③上述问题在不同自然单元有何差异?

## 1 研究区概况

中国北方干旱半干旱区生态系统较为脆弱,气候变化和人类活动的共同影响导致该地区沙漠化严重,进而引发自然环境恶劣、人地关系矛盾突出以及自然灾害频发等系列问题<sup>[17-18]</sup>。研究区属温带干旱和半干旱气候,区域内降水量少,降水量为156.36 mm,多年平均温度为8.63 °C<sup>[19]</sup>。植被稀疏,以草本和灌木为主。土壤肥力低,侵蚀严重,以沙质土和盐碱土为主。2020年沙漠化总面积为47.2万km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>,主要分布于新疆、内蒙古、青海、甘肃、西藏等省区,包括准噶尔盆地及天山、新疆南部、锡林

郭勒草原、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、内蒙古中部、毛乌素沙地、库姆塔格沙漠、库布齐沙漠、科尔沁沙地、浑善达克沙地、呼伦贝尔草地、河套平原、柴达木盆地和巴丹吉林沙漠等15个自然单元。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

NDVI数据使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的长时间序列植被指数数据集(NOAA CDR AVHRR NDVI V5),空间分辨率为0.05°×0.05°,时间分辨率为1 d。该数据集具有较高的时空一致性,已被广泛用于研究长时间序列的NDVI变化<sup>[21-22]</sup>。此数据采用年最大值合成并用最邻近法将分辨率重采样为5 km,从Google Earth Engine平台(<https://earthengine.google.com/>)下载,时间跨度为1982—2021年。

中国北方沙漠化土地和沙漠沙地分布数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),共包括1975、1990、2000、2005、2010、2015、2020年,空间分辨率为1 km。该数据集利用Landsat影像和地面调查,提取了中国北方地区自20世纪70年代中期以来不同类型和程度的沙漠化土地、沙漠沙地土地信息。15个自然地理单元的边界数据来源于《中国北方沙漠与沙漠化图集》<sup>[20]</sup>。

土地利用数据来自中国资源与环境科学数据中心(1 km,<http://www.resdc.cn>)提供的中国多时相土地利用遥感监测数据集。本研究使用1980年和2000年两期,选取两种一级类范围(林地、草地)。经过多年的实地调查,验证了解译数据的精度,平均分类精度高达90%以上,表明数据具有较高的可靠性和适用性<sup>[23]</sup>。

气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)提供的中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018年),空间分辨率为0.1°<sup>[24]</sup>。本研究选取1982—2018年的逐年近地面气温、空气比湿、全风速和地面降水率共4个气象因子,并使用最邻近法统一重采样为5 km。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 沙漠化区和邻近地带植被对照区的划分

本研究首先统计7期的沙漠化总面积(所有程

度的沙漠化),分析确定沙漠化的总体变化趋势。其次,本研究统计了沙漠化加剧和减轻的面积,沙漠化程度由低到高分轻度、中度、重度和严重沙漠化,沙漠化加剧指同一栅格后一时间段比前一时间段沙漠化程度高,反之,则沙漠化减轻。

由于沙漠化区域多处于三北防护林、退牧还草等生态工程区,本研究将不同程度的沙漠化区域均视为沙漠化治理区。结合沙漠沙地数据和土地利用数据,将沙漠化区周围8 km的林地和草地视为邻近地带植被对照区。根据沙漠化面积多年变化趋势发现,2000年沙漠化面积最大,因此研究时间范围划分为1982—2000、2000—2021、1982—2021年3个时间段,并以1975年沙漠化分布数据确定的沙漠化区和邻近地带植被对照区用于1982—2000年和1982—2021年NDVI分析,2000年确定的沙漠化区和邻近地带植被对照区用于2000—2021年NDVI分析。

由于沙漠化区和邻近地带植被对照区分布范围数据的分辨率(1 km)与NDVI数据(5 km)不一致,本研究将5 km×5 km范围内沙漠化区所占比例大于50%的NDVI像元视为沙漠化区NDVI,邻近地带植被对照区所占比例大于50%的NDVI像元视为地带植被对照区NDVI。

### 2.2.2 数据分析与统计

本研究采用Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall显著性检验分析每一个栅格NDVI的多年变化趋势和变化速率。Sen斜率估计方法具有计算效率高、对测量误差和离群数据不敏感的优点,因此经常被用于长时间序列的趋势分析中<sup>[25]</sup>,计算公式如下:

$$\hat{\beta} = \text{median}\left(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i}\right), i < j \quad (1)$$

式中:NDVI<sub>i</sub>和NDVI<sub>j</sub>为*i*年和*j*年的NDVI值。 $\hat{\beta}$ 表示增加或降低速率,大于0表示NDVI在研究时间内呈现上升趋势,反之,表示下降趋势。本研究进一步统计了沙漠化区、邻近地带植被对照区以及15个自然单元内显著增加和显著降低的面积比例以及增加和降低的速率均值。

Mann-Kendall检验不需要假设样本的分布函数,而是直接比较样本的秩排序,因此具有更可靠的结果<sup>[26]</sup>,计算公式如下:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(NDVI_j - NDVI_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(NDVI_j - NDVI_i) = \begin{cases} 1, & NDVI_j - NDVI_i > 0 \\ 0, & NDVI_j - NDVI_i = 0 \\ -1, & NDVI_j - NDVI_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:*S*为Mann-Kendall的检验统计量;NDVI<sub>i</sub>和NDVI<sub>j</sub>为*i*年和*j*年的NDVI值;*n*为时间段年份数;sgn为符号函数。当Z<sub>MK</sub>的绝对值大于1.96时,表明增长趋势通过95%的显著性检验;反之,则未能通过显著性检验。

本研究采用皮尔逊相关系数衡量不同气象因子(降水、空气比湿、气温、风速)对植被年际变异的影响大小,采用T检验( $\alpha=0.05$ )检验相关系数的显著性<sup>[21]</sup>。相关显著且相关系数绝对值最大的气候要素视为该栅格的主导气象因子,并进一步统计沙漠化区和邻近地带植被对照区各主导气象因子的相关系数均值及其占整个研究区的面积比例。NDVI均值、变化斜率和各气象因子相关系数等在沙漠化区和邻近地带植被对照区均值的差异采用方差分析,并用T检验计算两个区域均值的显著性( $\alpha=0.05$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 中国北方沙漠化时空格局

1975—2020年研究区沙漠化面积先增加后降低,2000年沙漠化面积最大,为354 339 km<sup>2</sup>,其中科尔沁沙地、浑善达克沙地、毛乌素沙地和新疆南部沙漠化面积较大(图1)。各个自然单元增减趋势与整个研究区基本一致,个别自然单元的峰值出现在1990年。1975—2000年,沙漠化加剧面积占比大于减轻面积,分别占沙漠化总面积的34.55%(124 547 km<sup>2</sup>)和6.30%(22 710 km<sup>2</sup>),其中锡林郭勒草原(57.91%)的沙漠化扩张严重,河套平原、库布齐沙漠、科尔沁沙地和呼伦贝尔草地沙漠化加剧面积占比也较大,而毛乌素沙地沙漠化减轻面积占比最大(10.48%,图2A)。2000—2020年情况相反,沙漠化



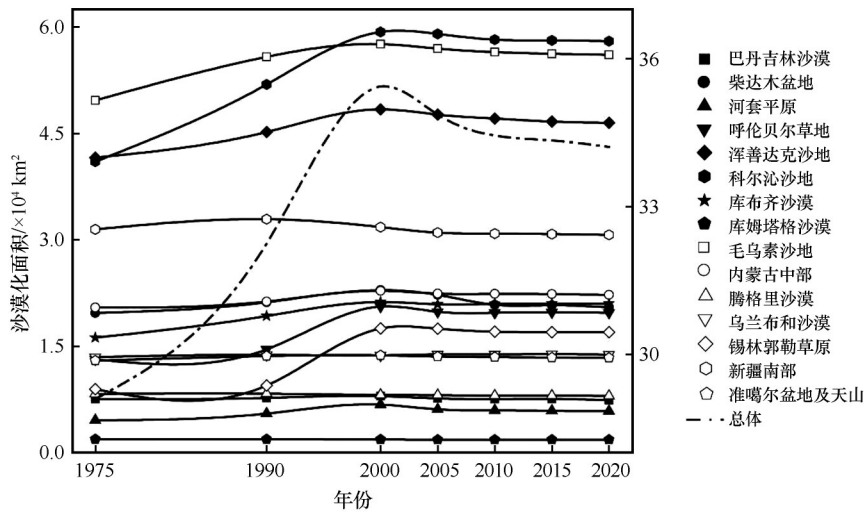
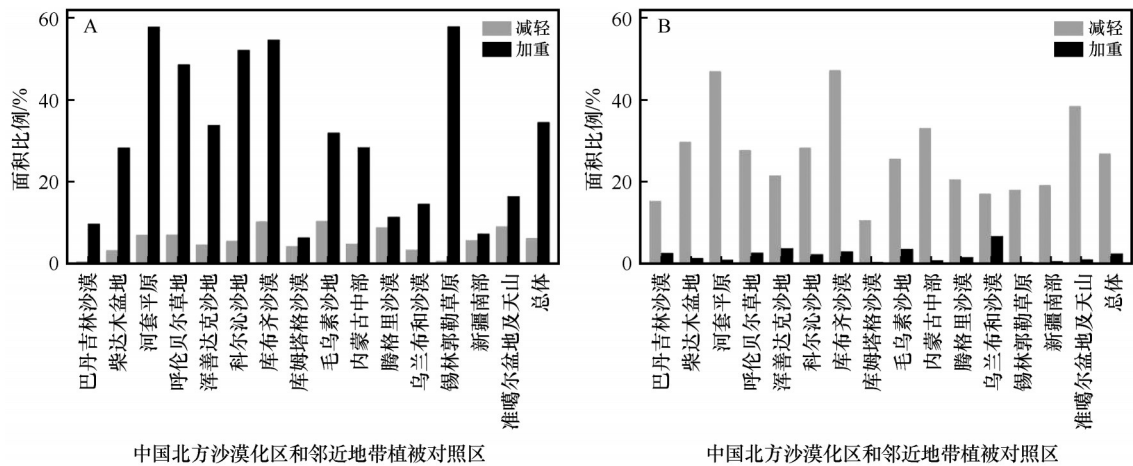


图1 中国北方及各自然单元不同时期沙漠化面积

Fig.1 Area of desertification in different periods and natural units in northern China



中国北方沙漠化区和邻近地带植被对照区

图2 2000年前(A)后(B)中国北方及各自然单元沙漠化减轻和加重面积比例

Fig.2 Proportion of area with mitigated and intensified desertification in northern China and various natural unit before 2000 (A) and after 2000 (B)

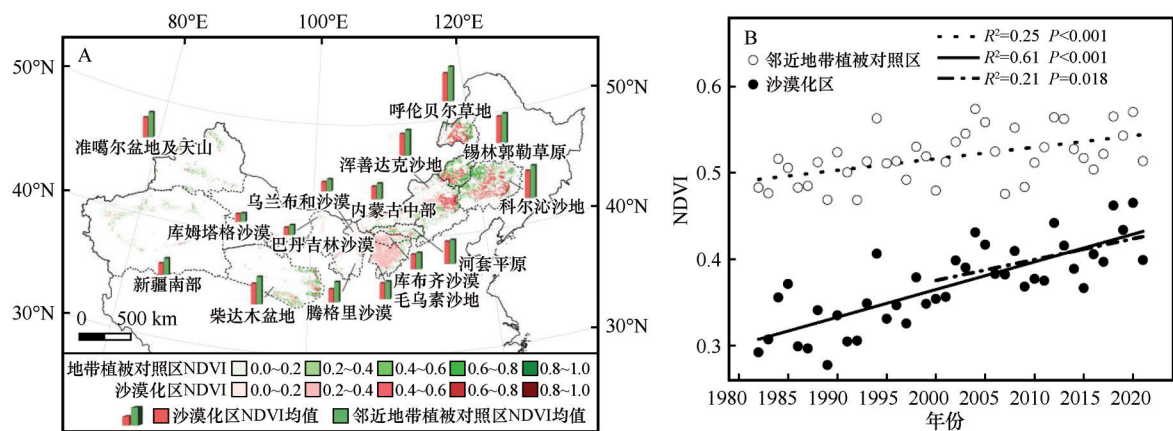
减轻面积占比(26.92%, 95 710 km<sup>2</sup>)高于加剧面积占比(2.45%, 8 694 km<sup>2</sup>),其中库布齐沙漠化减轻面积占比最大(47.29%),河套平原和准噶尔盆地及天山沙漠化减轻面积占比也较大(图2B)。

3.2 中国北方沙漠化区和邻近地带植被对照区 NDVI时空格局

除库姆塔格沙漠外,研究区各个自然单元邻近地带植被对照区 NDVI 均值均显著大于沙漠化区( $P < 0.05$ ,图 3A)。空间分布上,巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠、库姆塔格沙漠、内蒙古中部、新疆南部等中国中西部地区 NDVI 值相对较低,中国东北部呼伦贝尔草地、科尔沁沙地、锡林郭勒草原区域 NDVI 值相对较高(图 3A)。整个区域 NDVI 均值的多年变

化趋势分析表明,1982—2021 年以及 2000 年后沙漠化区 NDVI 呈显著增加趋势,其中 1982—2021 年沙漠化区增加速率( $k=0.0032$ ,  $R^2=0.61$ ,  $P<0.001$ )显著高于邻近地带植被对照区( $k=0.0013$ ,  $R^2=0.25$ ,  $P<0.001$ ,图 3B)。2000 年后沙漠化区 NDVI 的增加速率为 0.0024 a<sup>-1</sup>( $R^2=0.21$ ,  $P=0.018$ ),而 2000 年前沙漠化区以及邻近地带植被对照区的两个时期 NDVI 均无显著变化趋势( $P>0.05$ ,图 3B)。

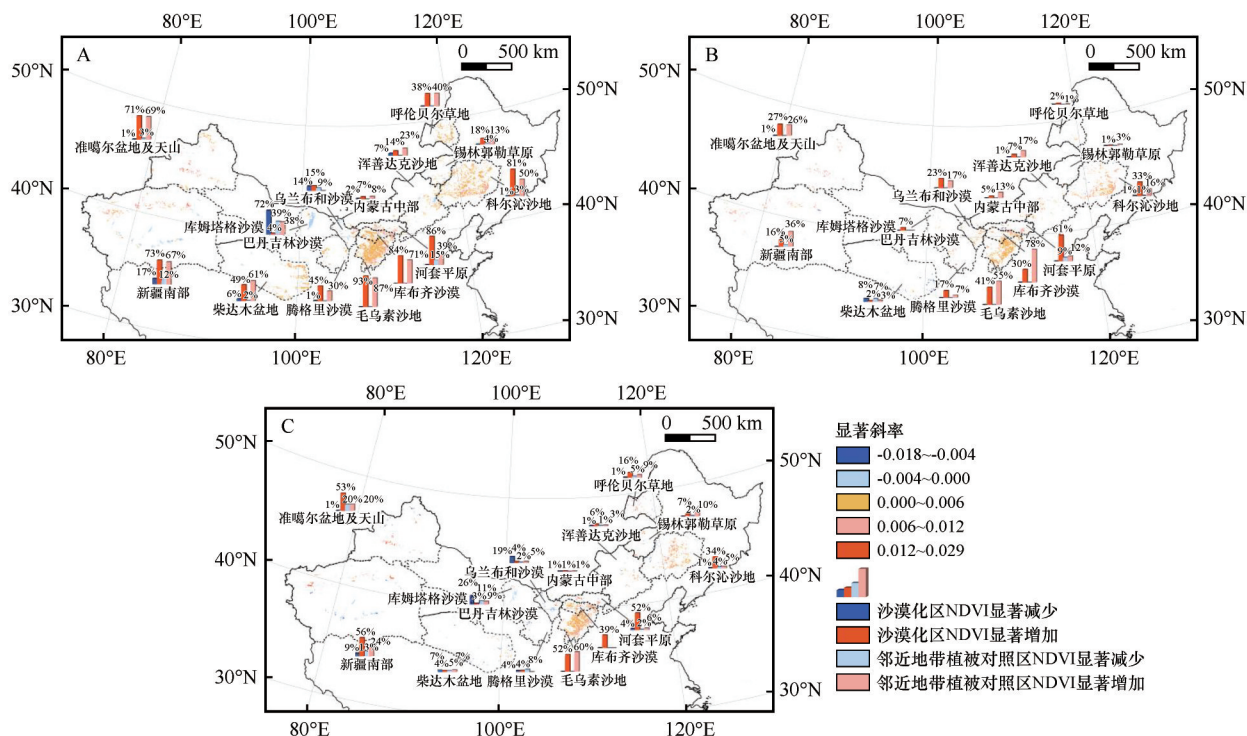
1982—2021 年,研究区内 44.5% 的面积 NDVI 显著增加,而 5.8% 的面积显著减少,其中沙漠化区 NDVI 显著增加的面积比例(45.7%)高于邻近地带植被对照区(41.7%,图 4A)。根据沙漠化面积多年的变化趋势,分别统计了 2000 年前后 NDVI 的变化差异。结果显示:虽然 2000 年前沙漠化区相当比例



基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2020)4619号制作,底图无修改)

图3 1982—2021年中国北方沙漠化区和邻近地带植被对照区NDVI年最大值均值空间格局(A)和年际变化(B)

Fig.3 Spatial (A) and temporal (B) patterns of mean values of annual NDVI maxima in desertification areas and adjacent zonal vegetation in northern China from 1982 to 2021



基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号GS(2020)4619号制作,底图无修改)

图4 1982—2021年(A)及2000年前(B)后(C)中国北方沙漠化区和邻近地带植被对照区NDVI多年变化速率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of changing rates of NDVI in the desertification and adjacent zonal vegetation in northern China from 1982 to 2021 (A), before 2000 (B) and after 2000 (C)

的区域沙漠化加剧,但1982—2000年研究区内仍有18.3%的面积NDVI显著增加,仅1.1%的面积显著减少,其中沙漠化区和邻近地带植被对照区分别有20.1%和13.4%的面积NDVI显著增加(图4B)。2000年后NDVI显著增加和减少的面积上升,分别为19.2%和4.3%,其中沙漠化区NDVI显著增加的面积占比(22.4%)仍高于邻近地带植被对照区

(10.0%),大部分自然单元沙漠化区显著增加占比均高于邻近地带植被对照区(图4C)。1982—2021年和2000年前后NDVI显著增加占比较高的自然单元主要有河套平原、科尔沁沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙漠、新疆南部和准噶尔盆地及天山等区域。

逐个栅格增加速率的均值统计分析也发现,1982—2021年沙漠化区总体NDVI增加的斜率均值

( $k=0.0055$ )显著高于邻近地带植被对照区( $k=0.0036$ ,  $P<0.05$ ),但内蒙古中部相反(图5A)。该结果在2000年前后存在一定差异,总体而言,2000年前沙漠化区( $k=0.0043$ )和邻近地带植被对照区( $k=0.0056$ )NDVI增加斜率均值显著低于2000年后(斜率分别为 $k=0.0073$ 和 $k=0.0067$ ,  $P<0.05$ )。2000年前邻近地带植被对照区NDVI增加斜率均值显著高于沙漠化区

(图5B),浑善达克沙地、毛乌素沙地、内蒙古中部和准噶尔盆地及天山与总体一致,但河套平原相反。2000年后,沙漠化区NDVI增加斜率均值显著高于邻近地带植被对照区,相较于邻近地带植被,呼伦贝尔草地、河套平原、新疆南部和准噶尔盆地及天山沙漠化区NDVI斜率增加幅度较大,其中河套平原和新疆南部通过显著性检验( $P<0.05$ ,图5C)。

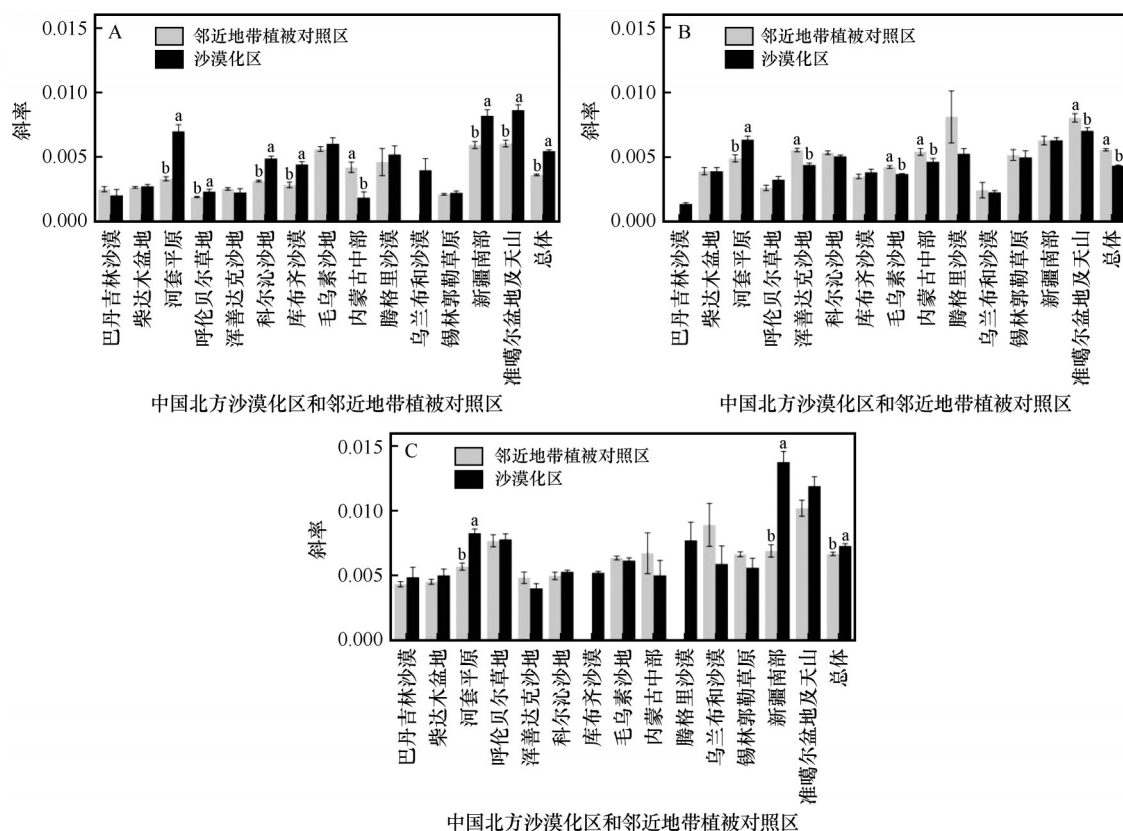


图5 1982—2021年(A)及2000年前(B)后(C)中国北方沙漠化区和邻近地带植被对照区NDVI增加速率对比

Fig.5 Comparison of NDVI increase rates in desertification and adjacent zonal vegetation in northern China from 1982 to 2021 (A), before 2000 (B) and after 2000 (C)

### 3.3 中国北方沙漠化区和邻近地带植被对照区气象影响因素对比

总体上,整个研究区的气象影响因素中,降水与NDVI显著正相关(相关系数均值为0.46),其为主导因素的面积最大,达到23.1%,风速与NDVI显著负相关,且其相关性最强(相关系数均值为-0.52)。其中,沙漠化区降水、空气比湿、风速与NDVI的相关系数均值显著低于邻近地带植被对照区(图6)。在各自然单元中,大部分地区沙漠化区各气象因子与NDVI的相关系数均值均小于地带植被对照区,但河套平原气温,准噶尔盆地及天山降水,科尔沁沙地降水、空气比湿和气温与NDVI的相

关系系数均值显著高于邻近地带植被对照区。影响沙漠化区NDVI的气象因子中,呼伦贝尔草地、浑善达克沙地、锡林郭勒草原和内蒙古中部受降水和空气比湿影响较大,科尔沁沙地、库布齐沙漠和准噶尔盆地及天山受风速影响较大,河套平原受气温影响较大(图6)。

## 4 讨论

整体上中国北方沙漠化面积先增加后降低,2000年左右沙漠化面积最大。2000年之前,河套平原、科尔沁沙地、库布齐沙漠、锡林郭勒草原沙漠化加剧严重,表明这些自然单元可能存在草地过度利



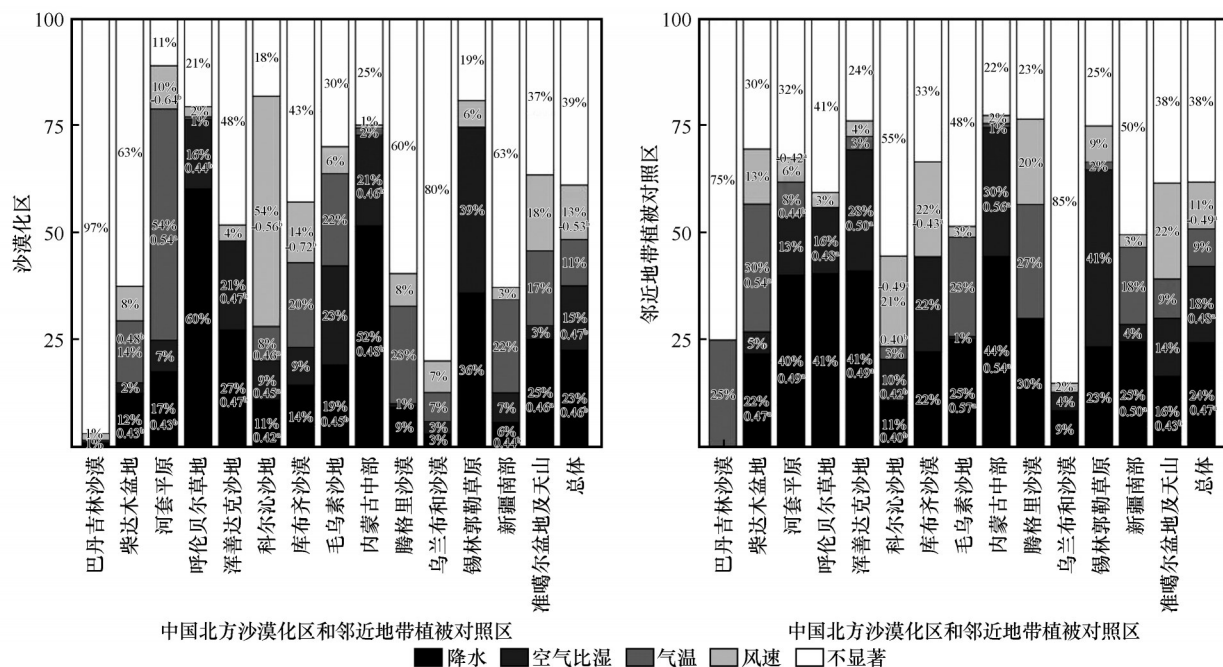


图6 中国北方沙漠化区和邻近地带植被对照区NDVI主要影响因素对比

Fig.6 Comparison of the main influencing factors of NDVI in desertification and adjacent zonal vegetation in northern China

用(如超载过牧、开荒等)或保护强度不高等问题。2000年之后,河套平原、库布齐沙漠、准噶尔盆地及天山沙漠化减轻程度较大,说明这些区域的沙漠化治理成效突出。沙漠化治理虽然已有70多年的历史,但是在沙漠化治理初期,主要在一些小面积的保护性工程,例如铁路防护、水源保护等<sup>[27]</sup>。同时,人们对沙漠化问题的认识也不足,沙漠化治理的投入相对较少<sup>[28]</sup>,在此阶段,沙漠化问题呈现出逐渐加剧的趋势。20世纪90年代末和21世纪初北方地区沙尘暴等自然灾害给人民生命和财产带来了巨大的损失<sup>[29]</sup>,因此,2000年左右,中国政府高度重视沙漠化防治工作,重点实施了“三北”防护林、退耕还林、天然林保护、京津风沙源治理等一系列生态工程<sup>[29-30]</sup>,以增加植被覆盖,减少土地退化和水土流失,2000年后沙漠化得到了较大的遏制。

1982—2021年沙漠化区NDVI逐年上升,即植被变绿。研究表明,全球叶面积指数显著增加,尽管中国植被面积仅占全球的6.6%,却是全球“变绿”的主要贡献者<sup>[1,31]</sup>,本研究与此结论一致。本研究还发现,变绿的速度在2000年前后存在一定差异,2000年后变绿速度和面积显著高于2000年前,这可能与沙漠化区的开发利用和保护进程有关。2000年前开发利用强度较高,治理强度较小,沙漠化加剧为主,而在2000年之后,保护强度高,生态工程大面积实施<sup>[32-33]</sup>,沙漠化减轻为主。变绿速度和面积

在沙漠化和邻近地带植被对照区也存在差异,1982—2021年及2000年前后沙漠化区域显著增加面积比例略高于邻近地带植被对照区,2000年后沙漠化区变绿速率大于邻近地带植被对照区,2000年前则相反。2000年前后沙漠化区和邻近地带植被对照区NDVI均显著增加,这可能与气候要素有关<sup>[34]</sup>。研究表明,中国北方干旱半干旱区在过去几十年降雨量呈增加趋势<sup>[35]</sup>,而中国北方干旱半干旱区植被主要受降水、大气饱和水汽压差等水分因子的影响<sup>[36-37]</sup>。同时,温室气体浓度升高可能会增加植被的光合速率,带来二氧化碳“施肥”效应<sup>[38]</sup>。这些气候变化共同导致北方干旱半干旱区生产力或植被指数增加,沙漠化区和邻近地带植被对照区均观测到了植被变绿的现象。2000年前由于过度利用和保护强度小,沙漠化区域内一方面由于沙漠化加剧本身会有一部分区域植被覆盖度逐年降低,另一方面,沙漠化的现状也导致植被覆盖度要低于邻近地带植被对照区,较低的植被覆盖度意味着沙漠化区域不能很好地利用有利的气候条件,其变绿速度小于邻近地带植被。2000年后则由于生态工程实施,沙漠化区域内相当一部分区域存在诸如飞播造林、封育等保护措施<sup>[6,39-40]</sup>,治理区植被覆盖度逐年增高,而邻近地带植被区植被覆盖度则变化不大,生态工程和气候要素同时作用导致2000年后沙漠化区域NDVI增加速率高于邻近地带植被对照区。

沙漠化区域的变绿主要分布在河套平原、库布齐沙漠、科尔沁沙地、毛乌素沙地和准噶尔盆地及天山,这些自然单元也大多是2000年后沙漠化面积减轻比例较高的区域,表明生态工程在这些自然单元得到了很好的实施。比如库布齐沙漠以实现消除沙尘暴源头、保护黄河流域生态安全为目标实施系列生态工程,自2003年以来区域沙漠化逆转过程明显,人为因素在防沙治沙中作用显著<sup>[41]</sup>。而毛乌素沙地则实施了退耕还林还草等工程恢复草原生态功能,在1990—2017年沙漠化土地总体处于逆转趋势<sup>[42]</sup>。值得注意的是,人类活动不仅仅以生态工程的形式促进沙漠化的修复,放牧和旅游等人类活动还可能影响植被对生态修复的响应,考虑到其他人类活动对沙漠化区和邻近地带植被对照区均有影响,本研究未区分其对沙漠化区和邻近地带植被对照区的影响差异。

降水和空气湿度是沙漠化区及邻近地带植被对照区NDVI的主导因素,这与前人结论一致<sup>[36-37]</sup>,水分是干旱半干旱区植被生长的主导因素。但大部分沙漠化区NDVI与降水和空气湿度的相关性都低于邻近地带植被对照区,表明自然植被区受降水、湿度等水分相关影响较大。这可能与沙漠化区人为管理措施有关,部分生态工程措施在实施初期为了提高苗木的存活率,进行如人工灌溉、雨水集中等措施<sup>[43]</sup>,所以降水和相对湿度等水分要素影响沙漠化区域植被变绿相对较邻近地带植被区弱。但这不表明沙漠化区受未来降水格局的影响小,人工管理措施不再实施后,由于过去部分沙漠化区的植被恢复选择了如速生杨等需水较高的物种<sup>[44]</sup>,沙漠化区可能比邻近地带植被区面临更大的气候考验,尤其是在极端降水(洪涝或干旱)背景下。值得注意的是,虽然降水是大部分区域NDVI的主导因素,但一方面个别自然单元,如科尔沁沙地、库布齐沙漠和准噶尔盆地及天山,风速影响因素更加突出;另一方面NDVI与风速的相关性较高,且沙漠化区的相关性高于自然植被区。较高的风速加剧了沙漠化的进程<sup>[45]</sup>,同时也严重妨碍沙漠化区土壤的固定及植被的定植<sup>[46]</sup>,因此研究区内NDVI与风速相关性较高,尤其是沙漠化区域内,相对于较稳定的邻近地带植被区,沙漠化区土壤表面的不稳定使得风速的影响加大。因此该区域植被恢复要重视风速的影响,尤其是风速为主导因素的自然单元,

未来生态工程实施中,一方面需要注意加大固沙植被的抗风害措施,如建造防护林带、设置遮挡网等;另一方面植被种植过程中,应该选择抗风性强、根系发达、土壤固结力强等特点的植物,以增强固沙防风的效果<sup>[27]</sup>。综上,科学、合理的修复措施需综合考虑水分、风速等气象因素的影响,并加大对固沙防风的措施投入,才能更好地促进沙漠化土地的生态环境改善和可持续发展。

## 5 结论

本研究以中国北方沙漠化及邻近地带植被对照区为研究区,基于长期NDVI和气象数据,分析了研究区内NDVI的多年变化趋势、变化速率及影响因素,并比较了其在沙漠化区和邻近地带植被对照区的差异。

1975—2020年研究区沙漠化面积先增加后降低,2000年达到最大值。其中科尔沁沙地、浑善达克沙地、毛乌素沙地和新疆南部沙漠化面积较大。

1982—2021年研究区内NDVI以显著增加为主,即变绿,其中沙漠化区NDVI的变绿面积和变绿速率大于邻近地带植被对照区,但该结论不完全适用于2000年前,2000年前沙漠化区变绿速率小于邻近地带植被对照区。

水分因子是研究区的主要影响因素,与NDVI显著正相关,但风速与NDVI显著负相关且相关性最高,沙漠化区NDVI与水分要素、风速相关系数均值显著低于邻近地带植被对照区。

## 参考文献:

- [1] Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [2] 李成, 杨舒慧, 吴芳, 等. “双碳”背景下中国能源消费碳排放与植被固碳的时空分异[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(4): 1945-1953.
- [3] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [4] Hua W, Chen H, Zhou L, et al. Observational quantification of climatic and human influences on vegetation greening in China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 425.
- [5] Lu F, Hu H, Sun W, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [6] Niu Q, Xiao X, Zhang Y, et al. Ecological engineering projects



- increased vegetation cover, production, and biomass in semiarid and subhumid northern China[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(13): 1620–1631.
- [7] Chen Y, Feng X, Tian H, et al. Accelerated increase in vegetation carbon sequestration in China after 2010: a turning point resulting from climate and human interaction [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(22): 5848–5864.
- [8] Liu Z, Wang J, Wang X, et al. Understanding the impacts of 'Grain for Green' land management practice on land greening dynamics over the Loess Plateau of China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105084.
- [9] 咎国盛, 王翠萍, 李锋, 等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. *林业资源管理*, 2023(1): 1–7.
- [10] 罗琦, 甄霖, 杨婉妮, 等. 生态治理工程对锡林郭勒草地生态系统文化服务感知的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 119–129.
- [11] 赵文智, 白雪莲, 刘婵. 巴丹吉林沙漠南缘的植物固沙问题[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(1): 5–11.
- [12] Di K, Hu Z, Wang M, et al. Recent greening of grasslands in northern China driven by increasing precipitation[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2021, 14(5): 843–853.
- [13] Zhao W, Yu X, Jiao C, et al. Increased association between climate change and vegetation index variation promotes the coupling of dominant factors and vegetation growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 144669.
- [14] Liu X, Xin L. China's deserts greening and response to climate variability and human activities [J]. *Plos One*, 2021, 16(8): e0256462.
- [15] Shao Q, Liu S, Ning J, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000–2019 using remote sensing[J]. *Acta Geogr Sin*, 2022, 77: 2133–2153.
- [16] 马启民, 贾晓鹏, 王海兵, 等. 气候和人为因素对植被变化影响的评价方法综述[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 48–55.
- [17] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000–2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 11–21.
- [18] 赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 中国西北干旱区降雪和极端降雪变化特征及未来趋势[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 81–90.
- [19] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(3): 385–393.
- [20] 王涛. 中国北方沙漠与沙漠化图集[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [21] Yan Y, Cheng J H, Li Y H, et al. Characteristics of NDVI changes in the Altay region from 1981 to 2018 and their relationship to climatic factors[J]. *Land*, 2023, 12(3): 564.
- [22] Burke W J, Snapp S S, Peter B G, et al. Sustainable intensification in jeopardy: transdisciplinary evidence from Malawi[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155758.
- [23] Liu J, Kuang W, Zhang Z, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24: 195–210.
- [24] He J, Yang K, Tang W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 1–11.
- [25] 赵楠, 赵颖慧, 邹海凤, 等. 1990–2020年黑龙江省植被覆盖度的时空变化趋势及驱动力[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1320–1330.
- [26] 陈文裕, 夏丽华, 徐国良, 等. 2000–2020年珠江流域NDVI动态变化及影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1306–1316.
- [27] 王涛. 中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的70年: II. 开拓篇(2)[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(3): 1–8.
- [28] 王涛, 赵哈林, 肖洪浪. 中国沙漠化研究的进展[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 3–15.
- [29] 段娟. 中国特色荒漠化防治道路的探索历程与经验启示[J]. *中国井冈山干部学院学报*, 2021, 14(6): 74–84.
- [30] 朱教君, 郑晓. 关于三北防护林体系建设的思考与展望: 基于40年建设综合评估结果[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1600–1610.
- [31] 李广东. 全球土地覆被时空变化与中国贡献[J]. *地理学报*, 2022, 77(2): 353–368.
- [32] 李军豪, 陈勇, 杨国靖, 等. 1975–2018年民勤绿洲沙漠化过程及其驱动机制[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 44–55.
- [33] 康婷婷, 李增, 高彦春. 西北干旱区山地-绿洲-荒漠系统生态恢复综合效益评估[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7418–7431.
- [34] 吴倩倩, 张晓, 徐书兴, 等. 亚洲内陆干旱区NDVI与树木生长的气候响应及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 1–10.
- [35] Zhang Q, Yang J, Wang W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of northwest China: multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 113–127.
- [36] Guo Q, Hu Z, Li S, et al. Spatial variations in aboveground net primary productivity along a climate gradient in Eurasian temperate grassland: effects of mean annual precipitation and its seasonal distribution [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(12): 3624–3631.
- [37] Zhao W, Hu Z, Guo Q, et al. Contributions of climatic factors to interannual variability of the vegetation index in northern China grasslands[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(1): 175–183.
- [38] Wang X M, Ge Q S, Geng X, et al. Unintended consequences of combating desertification in China [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1139.
- [39] Ma Y, Wang S, Zhang Q, et al. Aerial seeding promotes the restoration of ecosystem health in Mu Us Sandy Grasslands in China[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1255.
- [40] 曹瑞, 刘果厚, 兰庆, 等. 浑善达克沙地飞播区植被动态[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 535–544.
- [41] 王翠萍. 库布齐沙漠中段沙化土地动态变化及驱动力分析[J]. *林业资源管理*, 2018(1): 63–71.
- [42] 韩雪莹, 杨光, 秦富仓, 等. 毛乌素沙地近30年沙漠化土地时空动态演变格局[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 144–150.
- [43] 王涛. 中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的70年: I. 初创篇

- [J].中国沙漠,2022,42(1):1-4.
- [44] 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,2004,24(2):3-11.
- [45] Meng Z, Dang X, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J].Journal of Arid Land,2018,10:534-547.
- [46] Wei W, Wang B, Niu X. Soil erosion reduction by grain for green project in desertification areas of Northern China[J].Forests,2020,11(4):473.

## The effects of desertification control on the patterns of vegetation in arid and semi-arid regions of northern China

Liu Junhao<sup>1a,2</sup>, Zhou Haisheng<sup>1a,2</sup>, Guo Qun<sup>1ab,3</sup>

(1.a.Key Lab of Ecosystem Network Observation and Modeling, b.National Ecosystem Science Data Center, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 3.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** China, especially the arid and semi-arid regions of northern China, is one of the leading contributors in global greening, and ecological projects has been thought as the main causal factors. As a key desertification-combating actions, the impacts of desertification control on vegetation temporal dynamics have not been fully clarified. This study analyzed the differences of temporal dynamics of normalized difference vegetation index (NDVI) and its influencing factors between desertification vegetation and its adjacent zonal vegetation in arid regions of northern China. The results showed that: (1) Desertification in the study region initially expanded, peaked in 2000, and then reversed, implying desertification control worked after 2000. (2) During 1982–2021, NDVI in 44.5% of the study area significantly increased, while 5.8% of the study area experienced a notable reduction, suggesting a generally greening. The greening primarily occurred in the Hetao Plains, Horqin Sandy Land, Kubuqi, Mu Us Sandy Land, Southern Xinjiang, Junggar Basin and the Tianshan Mountains. More area in desertified areas (45.7%) showed remarkable increase than their adjacent zonal vegetation (41.7%). (3) Notably, the increasing rate after 2000 ( $0.0055 \text{ a}^{-1}$ ) markedly greater than that of pre-2000 ( $0.0036 \text{ a}^{-1}$ ). Moreover, larger increasing rate was found in desertified areas after 2000 but in adjacent zonal vegetation before 2000. (4) Precipitation and specific humidity were the dominant factors in both the desertification and their adjacent zonal vegetation, with wind speed exerting a more significant influence in some natural units. The correlation coefficient of NDVI with moisture was lower in desertified areas compared with their adjacent zonal vegetation, whereas wind speed exhibited a stronger correlation. Our results will provide a scientific foundation to evaluate desertification control effectiveness in the past and improve related measures in the future.

**Key words:** arid zone of northern China; desertification control; greening; temporal variation