

# 基于地理探测器的科尔沁沙地植被NDVI时空变化特征及其驱动因素

陈雪萍<sup>1,3</sup> 赵学勇<sup>2,3\*</sup> 张晶<sup>2</sup> 王瑞雄<sup>1,3</sup> 卢建男<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>2</sup>中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; <sup>3</sup>中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站, 内蒙古通辽 028300

**摘要** 科尔沁沙地是内蒙古地区典型而且高度退化的农牧交错区域。受气候变化和沙地恢复政策的影响, 该区域近20年来植被发生了显著的变化。该研究基于2001–2020年MOD13A2归一化植被指数(NDVI)数据与10个重要的驱动因子(年平均气温、年降水量、坡度、土壤类型、植被类型、地貌类型、人口密度、累积造林面积、牲畜密度和农作物种植面积)的空间关联, 采用地理探测器模型量化了各驱动因子对科尔沁沙地植被NDVI的影响力和相互作用, 确定了有利于植被生长的各驱动因子的适宜范围。结果表明: (1) 20年来, 科尔沁沙地植被覆盖度逐渐增加, 植被明显恢复地区面积超过64.91%, 主要分布在科尔沁沙地北部、中部以及东南缘区域。(2)土壤类型、地貌类型和年平均气温对科尔沁沙地植被NDVI的影响力较大。(3)各驱动因子之间的交互作用为非线性增强和双因子增强, 其中土壤类型与其他因子存在较强的交互作用。(4)有利于科尔沁沙地植被生长的驱动因子适宜范围, 如: 土壤类型为淋溶土, 地貌类型为丘陵及小起伏山地, 年平均气温4.68–5.67 °C等环境条件, 能够对植被适应变化环境起到缓冲作用。该研究结果有助于更好地理解植被变化的复杂机制, 为后期科尔沁沙地植被恢复的综合治理以及生态工程的合理实施提供科学依据。

**关键词** 归一化植被指数; 地理探测器; 驱动因子; 植被恢复; 科尔沁沙地

陈雪萍, 赵学勇, 张晶, 王瑞雄, 卢建男 (2023). 基于地理探测器的科尔沁沙地植被NDVI时空变化特征及其驱动因素. 植物生态学报, 47, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0020

## Variation of NDVI spatio-temporal characteristics and its driving factors based on geodetector model in Horqin Sandy Land, China

CHEN Xue-Ping<sup>1,3</sup>, ZHAO Xue-Yong<sup>2,3\*</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>, WANG Rui-Xiong<sup>1,3</sup>, and LU Jian-Nan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>2</sup>Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; and <sup>3</sup>Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Tongliao, Nei Mongol 028300, China

### Abstract

**Aims** Horqin Sandy Land is an important, but highly degraded, agro-pastoral region in the northern China region of Nei Mongol. There have been significant changes in vegetation condition over the past two decades, in response to changes in climate as well as restoration policies. In this study, we characterize the spatial and temporal changes in vegetation in the region over the past twenty years, in order to understand the complex mechanism of vegetation change, and provide a scientific basis for comprehensive management and rational implementation of ecological engineering in the future.

**Methods** We assessed the correlation between a timeseries of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (derived from MODIS) from 2001 to 2020 with 10 key driving factors (including mean annual temperature, mean annual precipitation, slope, soil type, vegetation type, geomorphic type, population density, accumulated afforestation area, livestock density, and crops area) in space on random sampling points, which were generated in ArcGIS software. Geodetector model was used to explore the individual relationships as well as their interactions.

**Important findings** The results demonstrated that: (1) over the past 20 years, the vegetation coverage of Horqin Sandy Land has been gradually recovering, primarily in the northern, central and southeastern marginal areas of the study area, recovery area accounted for more than 64.91%. (2) Changes in NDVI were primarily explained in

收稿日期Received: 2022-01-13 接受日期Accepted: 2023-03-13

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2017FY100200)。Supported by the National Science and Technology Basic Resources Survey Special of China (2017FY100200).

\* 通信作者Corresponding author (zhaoxy@lzb.ac.cn)

Horqin Sandy Land by variation in three factors, soil type, geomorphic type, and mean annual temperature. (3) The interactions between explanatory factors were nonlinearly and mutually enhanced, of these, there was a strong interaction between soil type and other factors. (4) Increases in vegetation cover in Horqin Sandy Land was primarily observed in association with alfisol, hills or small undulating mountains, and annual average temperature ranges 4.68–5.67 °C and so on. Future restoration programs may want to prioritize sites with these conditions.

**Key words** Normalized Difference Vegetation index; geodetector model; driving factor; vegetation restoration; Horqin Sandy Land

Chen XP, Zhao XY, Zhang J, Wang RX, Lu JN (2023). Variation of NDVI spatio-temporal characteristics and its driving factors based on geodetector model in Horqin Sandy Land, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0020

草地荒漠化是近年来倍受关注的全球性问题之一,也是中国北方最主要的生态环境问题之一(Wang *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2015)。植被具有改善区域气候、保持水土等作用,被认为是反映区域生态质量的重要指标(Parmesan & Yohe; 罗新兰等, 2020)。在沙地生态系统中,植被不但能够减弱风蚀而且还能改善沙土环境从而遏制和逆转土地沙漠化。因此,植被的破坏与恢复程度可以决定土地沙漠化的发展与治理情况(郭泽呈等, 2020)。长时间尺度的植被变化可以代表区域土地沙漠化的变化情况,遥感技术可以实现对长时间、大尺度的植被变化进行估算和监测(He *et al.*, 2017)。归一化植被指数(NDVI)是监测生态系统和区域植被变化的重要指标,能有效反映区域植被覆盖程度与生长状态(Wang *et al.*, 2015)。

科尔沁沙地是我国面积最大的沙地,生态环境非常脆弱。近百年来,受气候变化和人类活动的影响,该地区以林草为特征的区域逐渐退化为沙地(Han *et al.*, 2010)。近几十年,在植被恢复重建等生态工程措施影响下,部分地区植被覆盖度发生了显著的变化。Huang等(2008)采用趋势分析法得出1998–2006年科尔沁沙地植被覆盖度呈增加趋势且增幅较大;魏丰良等(2012)通过土壤调节植被指数(SAVI)表明2000–2009年科尔沁沙地东部和西北部地区的植被生长较好,西南部地区的植被空间变异最显著;李生勇等(2016)研究发现2004–2013年科尔沁地区植被覆盖度以 $0.033 \cdot a^{-1}$ 的增速变化;崔珍珍等(2021)采用趋势分析、变异系数、Hurst指数及偏相关分析方法,得出1982–2015年科尔沁沙地植被NDVI格局呈“南北高,中间低”的分布特征。上述研究对不同时期的科尔沁沙地植被NDVI时空变化进行了探讨,通过相关系数、变异系数等方法分析了驱动因子与植被的关系。当植被与驱动因子的关系

是线性且遵循正态分布时,这些传统的统计方法才有效(Gu *et al.*, 2018),但是植被生长对环境变化的响应过程,并不存在完全符合统计标准的线性关系(Hein *et al.*, 2011),是传统方法的不足。相比之下,地理探测器是一种探测空间分异性并揭示其潜在影响因子的新方法,其优点在于不必严格遵循传统统计方法的假设以及复杂的参数设置过程,此外,还可以消除和忽略输入要素的多重共线性,而且增加或者减少要素也不会影响其他要素的结果(Ding *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2020)。

因此,本研究采用地理探测器分析了2001–2020年科尔沁沙地植被NDVI变化的基本特征以及自然因子和人为因子对植被变化的影响,通过地理探测器的各个模型定量研究了各驱动因子影响力、交互力和适宜性范围。研究结果可为科尔沁沙地植被恢复以及生态工程的合理布局提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

科尔沁沙地位于 $117.82^{\circ}$ – $123.70^{\circ}$  E、 $41.68^{\circ}$ – $46.08^{\circ}$  N。地处内蒙古高原向东北平原过渡地带,西起燕山山系的七老图山,东至松辽平原西部,南以努鲁儿虎山为界,北接大兴安岭山地南缘,地势西高东低,南北高中部低。研究区内共有14个旗县,总面积 $12.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。属于温带大陆性季风气候,年平均气温 $5.2$ – $6.4$  °C、年降水量 $350$ – $500$  mm(赵哈林等, 2008)。土壤类型以松散的沙质土为主,其次是草甸土和栗钙土。植被类型为疏林,乔木优势种有榆树(*Ulmus pumila*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等;灌木有盐蒿(*Artemisia halodendron*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等;多年生草本有白草(*Pennisetum centrasiticum*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、羊草(*Leymus chinenses*)等;沙丘上多被沙米(*Agriophyllum*

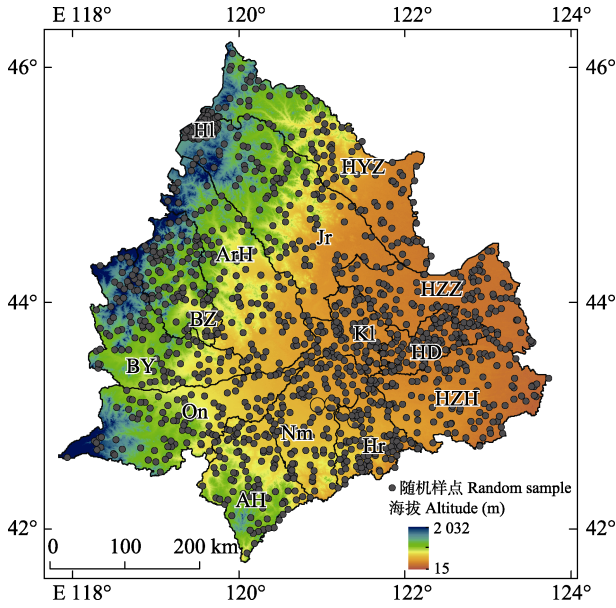


图1 科尔沁沙地随机样点分布图。Ah, 敖汉旗; ArH, 阿鲁科尔沁旗; BY, 巴林右旗; BZ, 巴林左旗; HD, 科尔沁区; HI, 霍林郭勒市; Hr, 库伦旗; HYZ, 科尔沁右翼中旗; HZH, 科尔沁左翼后旗; HZZ, 科尔沁左翼中旗; Kl, 开鲁县; Jr, 扎鲁特旗; Nm, 奈曼旗; On, 翁牛特旗。

Fig. 1 Distribution of random samples in Horqin Sandy Land. Ah, Aohan Banner; ArH, Ar Horqin Banner; BY, Bairin You Banner; BZ, Bairin Zuo Banner; HD, Horqin District; HI, Huolingol City; Hr, Hure Banner; HYZ, Horqin Youyizhong Banner; HZH, Horqin Zuoyihou Banner; HZZ, Horqin Zuoyizhong Banner; Kl, Kailu County; Jr, Jarud Banner; Nm, Naiman Banner; On, Ongniutd Banner.

*squarrosus*)等一年生植物占据(王涛, 2003)。

## 1.2 数据来源

植被NDVI数据来源于搭载在NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)上的Terra卫星获取的16天合成的MOD13A2数据集。仅保留质量良好的像元, 用最大合成法(MVC) (Hope *et al.*, 2003)提取2001–2020年逐月NDVI值。本研究选取2001、2010、2020年各驱动因子数据输入模型, 数据来源见表1。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 趋势分析

采用一元线性回归方法分析植被NDVI时空格局变化趋势(王文辉等, 2017)。计算公式:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中, slope为回归方程斜率;  $t$ 时间,  $\text{NDVI}_i$ 为第 $i$ 年的NDVI值。slope > 0表示植被NDVI呈增加趋势, slope

≤ 0表示下降趋势。

### 1.3.2 地理探测器模型

地理探测器模型是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法(Huang *et al.*, 2014), 其基本理论是从空间分层异质性角度判断两个变量空间分布的相似性(王劲峰和徐成东, 2017)。该模型包括4种类型:

(1) 因子探测: 用于探测驱动因子 $X$ 对植被NDVI变化的影响力大小, 用 $q$ 表示。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (2)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2 \quad (3)$$

式中,  $h = 1, 2, \dots, L$ 为变量 $Y$ 或因子 $X$ 的分类或分区;  $N$ 和 $N_h$ 分别是全区和层 $h$ 的单元数;  $\sigma_h^2$ 和 $\sigma^2$ 分别是层 $h$ 和全区的 $Y$ 值方差;  $\text{SSW}$ 与 $\text{SST}$ 分别为层内方差之和与区域总方差。 $q$ 值范围[0, 1], 值越大表示驱动因子对植被NDVI影响力越强。

(2) 交互探测: 用于识别驱动因子之间的交互作用, 即驱动因子 $X_1$ 和 $X_2$ 共同作用是否会增加或减弱对植被NDVI的影响力, 或者这些驱动因子对植被NDVI的影响是否相互独立。交互作用关系分为5类(表2)。

(3) 风险探测: 用于判断两个驱动因子子区域之间的属性均值是否有显著差别, 找出植被覆盖好的区域。用 $t$ 统计量来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[ \frac{\text{Var}(Y_{h=1})}{n_h = 1} + \frac{\text{Var}(Y_{h=2})}{n_h = 2} \right]^{1/2}} \quad (4)$$

式中,  $\bar{Y}_h$ 为子区域 $h$ 内植被NDVI属性均值;  $nh$ 为子区域 $h$ 内样本数量;  $\text{Var}$ 表示方差。

(4) 生态探测: 用于判断两个因子 $X_1$ 与 $X_2$ 对植被NDVI空间分布哪个更具有影响力。以 $F$ 统计量来衡量。

$$F = \frac{N_{X_1} \times (N_{X_2} - 1) \times \text{SSW}_{X_1}}{N_{X_2} \times (N_{X_1} - 1) \times \text{SSW}_{X_2}} \quad (5)$$

$$\text{SSW}_{X_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2, \text{SSW}_{X_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2 \quad (6)$$

式中,  $N_{X_1}$ 及 $N_{X_2}$ 分别表示两个驱动因子 $X_1$ 和 $X_2$ 的样本数量;  $\text{SSW}_{X_1}$ 和 $\text{SSW}_{X_2}$ 分别表示两个驱动因子 $X_1$ 和 $X_2$ 形成分层的层内方差之和;  $L_1$ 和 $L_2$ 分别表示变

表1 归一化植被指数(NDVI)的驱动因子

Table 1 Driving factors of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

类型 Type	驱动因子 Driving factor	指标 Index	单位 Unit	数据来源 Data resource
自然因素 Natural factor	$X_1$	年平均气温 Mean annual temperature	℃	中国气象数据共享网 China Meteorological Data Service Center <a href="http://www.nmic.cn/">http://www.nmic.cn/</a>
	$X_2$	年降水量 Mean annual precipitation	mm	中国气象数据共享网 China Meteorological Data Service Center <a href="http://www.nmic.cn/">http://www.nmic.cn/</a>
	$X_3$	坡度 Slope	°	美国NASA获取的SRTM 30 m DEM数据 SRTM 30m DEM data acquired by NASA <a href="https://nasasearch.nasa.gov/">https://nasasearch.nasa.gov/</a>
	$X_4$	土壤类型 Soil type	—	中科院资源环境科学数据中心 Resource and Environment Science and Data Center, Chinese Academy of Sciences (CAS) <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
	$X_5$	植被类型 Vegetation type	—	中科院资源环境科学数据中心 Resource and Environment Science and Data Center, CAS <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
	$X_6$	地貌类型 Geomorphologic type	—	中科院资源环境科学数据中心 Resource and Environment Science and Data Center, CAS <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a>
人为因素 Anthropogenic factor	$X_7$	人口密度 Population density	人·km <sup>-2</sup> person·km <sup>-2</sup>	内蒙古自治区统计年鉴 Inner Mongolia Statistical Yearbook <a href="http://tj.nmg.gov.cn/tjyw/jpsj/">http://tj.nmg.gov.cn/tjyw/jpsj/</a>
	$X_8$	累积造林面积 Accumulated afforestation area	hm <sup>2</sup> ·km <sup>-2</sup>	中国林业统计年鉴 China Forestry Statistical Yearbook <a href="https://www.tongjinnianjian.com/111453.html">https://www.tongjinnianjian.com/111453.html</a>
	$X_9$	牲畜密度 Livestock density	头·km <sup>-2</sup> head·km <sup>-2</sup>	内蒙古自治区统计年鉴 Inner Mongolia Statistical Yearbook <a href="http://tj.nmg.gov.cn/tjyw/jpsj/">http://tj.nmg.gov.cn/tjyw/jpsj/</a>
	$X_{10}$	农作物种植面积 Crops area	hm <sup>2</sup> ·km <sup>-2</sup>	内蒙古自治区统计年鉴 Inner Mongolia Statistical Yearbook <a href="http://tj.nmg.gov.cn/tjyw/jpsj/">http://tj.nmg.gov.cn/tjyw/jpsj/</a>

表2 两因子间的交互作用类型

Table 2 Interaction type of two factors

交互作用类型 Interaction type	$q$ 值关系 $q$ value relationship
非线性减弱 Non-linear reduction	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
单因子非线性减弱 Single factor non-linear reduction	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
双因子增强 Bi-factor enhancement	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
独立 Independent	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强 Non-linear enhancement	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

$q$ 为驱动因子对植被的影响力;  $X_1, X_2$ 分别表示任意两个驱动因子。

$q$  represents the influence of driving factor on vegetation;  $X_1, X_2$  denotes any of two driving factors.

量 $X_1$ 和 $X_2$ 分层数目。

## 1.4 驱动因子选取

### 1.4.1 NDVI数据选取及等级划分

为了更好地分析科尔沁沙地植被覆盖动态变化,按照等间距法(彭文甫等, 2016)将植被NDVI划分为

低覆盖度(<0.2)、中低覆盖度(0.2–0.4)、中高覆盖度(0.4–0.6)和高覆盖度( $\geq 0.6$ )共4个等级。利用slope趋势分析得到2001–2020年科尔沁沙地植被NDVI变化趋势空间分布,根据显著性检验结果和变化斜率大小,将NDVI变化趋势分为5类:极显著退化(–0.023 – –0.015)、显著退化(–0.015 – –0.001)、无显著变化(–0.001 – –0.001)、显著改善(0.001–0.015)和极显著改善(0.015–0.026)。

### 1.4.2 其他驱动因子选取

已有研究表明,自然因子如气候、土壤、地形等会显著影响植被NDVI (Lu *et al.*, 2020; 刘宁等, 2022), 人口密度、农作物种植面积等人为因子也会对植被NDVI产生作用(Liu *et al.*, 2018), 结合科尔沁沙地地理位置以及区域特点,还选取了累计造林面积和牲畜密度等因子。最终确定了6类自然因子以及4类人为因子(表1)。由于地理探测器模型输入需要将连续性变量处理为离散变量,本研究采用R软件“GD”包最优参数地理探测器模型(OPGD模型)进

表3 归一化植被指数(NDVI)各驱动因子的分级标准

Table 3 Grading standards of driving factors for Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

分级 Class	$X_1$ (°C)	$X_2$ (mm)	$X_3$ (°)	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$ (person·km <sup>-2</sup> )	$X_8$ (hm <sup>2</sup> ·km <sup>-2</sup> )	$X_9$ (head·km <sup>-2</sup> )	$X_{10}$ (hm <sup>2</sup> ·km <sup>-2</sup> )
1	4.68–5.67	462.77–492.69	0–2	淋溶土 Alfisols	针叶林 Needle leaf forest	平原 Plain	17.67–41.26	1.69–2.94	8.99–70.65	13.30–13.40
2	5.67–6.45	492.69–511.24	2–3	钙层土 Pedocal	阔叶林 Broad-leaved forest	台地 Platform	41.26–49.39	2.94–4.41	70.65–96.30	13.40–16.09
3	6.45–7.07	511.24–529.69	3–5	初育土 Primary	灌丛 Shrub	丘陵 Hill	49.39–56.81	4.41–4.89	96.30–110.69	16.09–18.02
4	7.07–7.66	529.69–547.57	5–8	半水成土 Semi-hydromorph	草原 Steppe	小起伏山地 Small undulating mountain	56.81–67.65	4.89–5.14	110.69–118.50	18.02–18.89
5	7.66–8.22	547.57–566.55	8–10	水成土 Hydromorph	草甸 Meadow	中起伏山地 Middle undulating mountain	67.65–86.71	5.14–5.29	118.50–128.85	18.89–20.18
6	8.22–8.72	566.55–587.78	10–13	盐碱土 Saline-alkali	人工林 Artificial forest		86.71–132.62	5.29–5.56	128.85–141.48	20.18–21.56
7	8.72–9.32	587.78–628.31	13–15	湖泊水库 Lakes and reservoirs			132.62–260.95	5.56–7.89	141.48–224.26	21.56–33.17
8			15–17	河流 Rivers						
9			17–30	河内沙洲 Island						

$X_1$ , 年平均气温;  $X_2$ , 年降水量;  $X_3$ , 坡度;  $X_4$ , 土壤类型;  $X_5$ , 植被类型;  $X_6$ , 地貌类型;  $X_7$ , 人口密度;  $X_8$ , 累积造林面积;  $X_9$ , 牲畜密度;  $X_{10}$ , 农作物种植面积。

$X_1$ , mean annual air temperature;  $X_2$ , mean annual precipitation;  $X_3$ , slope;  $X_4$ , soil type;  $X_5$ , vegetation type;  $X_6$ , geomorphic type;  $X_7$ , population density;  $X_8$ , accumulated afforestation area;  $X_9$ , livestock density;  $X_{10}$ , crops area.

行连续变量离散化, 该方法通过优化数据的空间尺度和离散化过程能够确定出地理探测器模型的最佳参数组合(Song *et al.*, 2020)。所以, 对气温、降水、坡度、人口密度、累积造林面积、牲畜密度以及农作物种植面积7类因子用OPGD模型选择出最合适的分类方法以及分类等级; 土壤类型、地貌类型和植被类型按照数据已有的分类标准进行分类, 分类结果列于表3。在ArcGIS软件中对研究区域进行随机采样, 间距设为1 km, 随机生成1 379个样点(图1)。通过空间位置关联采样点的植被NDVI和所有驱动因子, 分析植被NDVI与各因子之间的定量关系(张华等, 2021)。

## 2 结果和分析

### 2.1 植被NDVI时空分布与变化特征

近20年来, 科尔沁沙地植被NDVI时空格局发生了显著变化。在年均植被NDVI趋势图上绘制了5年滑动平均曲线, 滑动平均法是时间序列上消除变量不稳定波动, 显示其变化平稳性的一种方法(魏

凤英, 2007)。植被NDVI年均值整体呈波动上升趋势, 2004–2012年期间有明显波动下降趋势(图2)。空间上, 2001年, 植被NDVI中低值区和中高值区主要分布科尔沁沙地的中部和南部(图3), 占总面积96.70%; 2010年, 植被低值区占比略有上升, 说明植被覆盖度降低; 到2020年, 中低值区占比减少到50.97%, 中高值区和高值区比例明显增加, 分别为41.66%和3.06%, 说明植被覆盖度逐渐升高(表4)。植被NDVI显著增加的区域占比超过64.91%, 主要分布于科尔沁沙地北部、中部及南部山区; 植被NDVI显著退化区与无显著变化区占比分别为14.84%和20.08%, 主要分布在巴林右旗和翁牛特旗北部等地区。高值区主要分布在北部山地森林区; 低值区集中分布在翁牛特旗东部以及奈曼旗西北部, 这些地区主要为半流动-流动沙丘, 植被盖度低。

### 2.2 驱动因子影响力分析

#### 2.2.1 驱动因子影响力变化

2001–2020年, 年平均气温、年降水量、植被类型以及农作物种植面积的影响力逐渐降低(图4A);

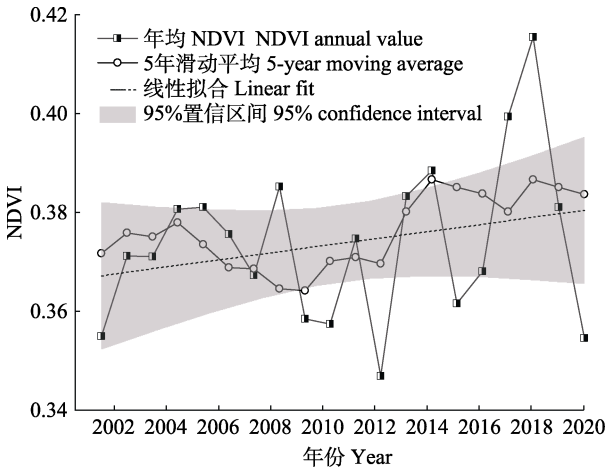


图2 科尔沁沙地2001–2020年归一化植被指数(NDVI)平均值变化趋势。

Fig. 2 Variation trend of mean value of normalized difference vegetation index (NDVI) in Horqin Sandy Land during 2001–2020.

人口密度的影响力逐年增加; 其中, 年平均气温、年降水量和农作物种植面积对科尔沁沙地植被NDVI影响力波动变化较为明显。通过计算各因子多年 $q$ 均值, 得出各因子对科尔沁沙地植被NDVI影响程度依次为: 土壤类型>地貌类型>年平均气温>植被类型>农作物种植面积>年降水量>坡度>累计造林面积>牲畜密度>人口密度。根据图4B, 影响力较大的因子分别为土壤类型(0.157)、地貌类型(0.141)和年平均气温(0.134), 说明自然因子主导了该地区植被NDVI变化。

2.2.2 驱动因子交互作用以及显著性差异

根据交互探测以及生态探测结果(图5), 各驱动因子交互都存在增强效应, 说明单个因子与其他因子相互作用时, 对植被NDVI的影响力会增强, 主要表现为非线性增强, 其次为双因子增强。其中交互

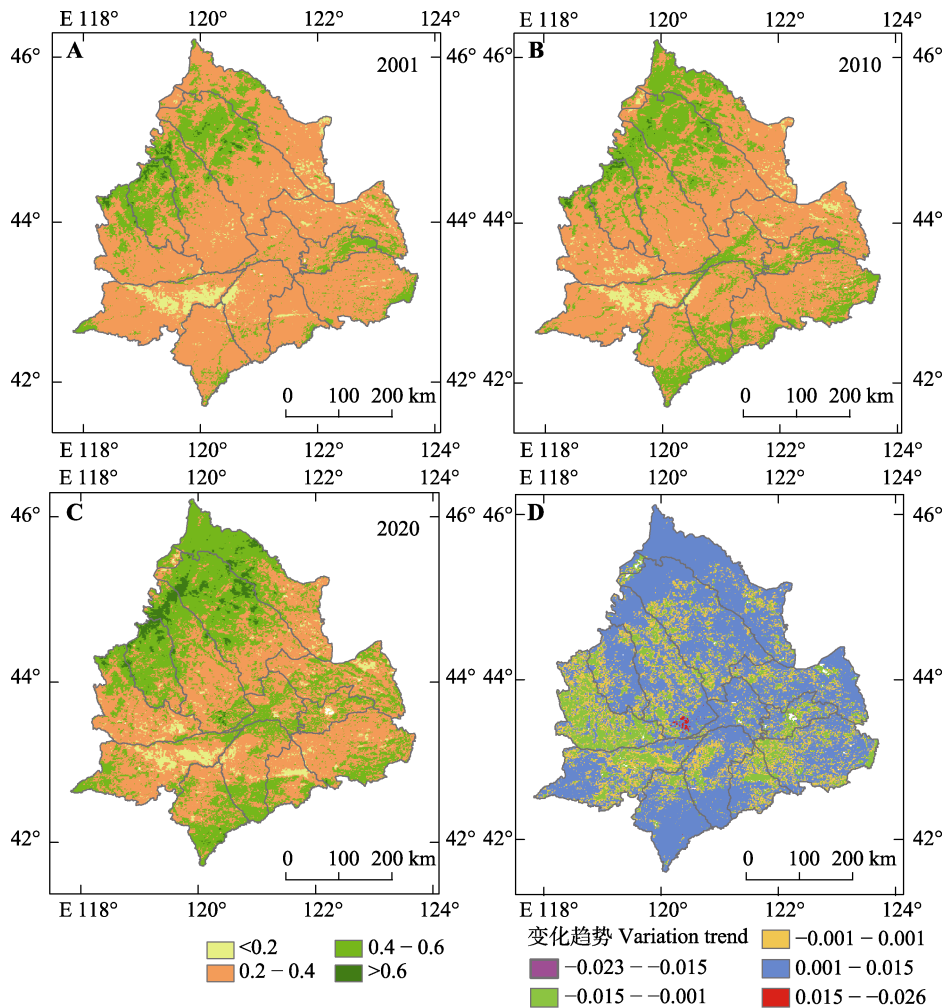


图3 科尔沁沙地年平均归一化植被指数(NDVI)及变化空间分布。A、B、C分别为2001、2010、2020年研究区NDVI空间分布图。D为研究区2001–2020年NDVI变化趋势图。

Fig. 3 Spatial distribution of normalized difference vegetation index (NDVI) in Horqin Sandy Land. A, B, C represents the spatial distribution of mean annual NDVI of the study area in 2001, 2010 and 2020, respectively. D shows the variation trend of NDVI in the study area from 2001 to 2020.

表4 科尔沁沙地2001–2020年归一化植被指数(NDVI)动态变化

Table 4 Dynamic changes of normalized difference vegetation index (NDVI) in Horqin Sandy Land during 2001–2020

NDVI分级 NDVI Class	2001		2010		2020	
	面积 Area (km <sup>2</sup> )	比例 Proportion (%)	面积 Area (km <sup>2</sup> )	比例 Proportion (%)	面积 Area (km <sup>2</sup> )	比例 Proportion (%)
< 0.2	4 696	2.79	6 905	4.10	7 265	4.31
0.2–0.4	114 900	68.20	116 634	69.22	85 884	50.97
0.4–0.6	48 028	28.50	44 176	26.22	70 181	41.66
≥0.6	866	0.51	775	0.46	5 160	3.06

作用最显著的是土壤类型与年平均气温和地貌类型的交互, 分别达到0.33和0.32; 交互作用较小的是坡度与农作物种植面积和年降水量的交互。此外, 自然因子如土壤类型、地貌类型分别与人为因子之间也存在着较高的交互作用, 这进一步说明土壤类型和地貌类型等自然因子是影响植被NDVI的主要因素。

生态探测结果得出,  $q$ 值较高的土壤类型、地貌类型对植被NDVI变化的影响显著不同于其他因子, 其中, 土壤类型和地貌类型分别与降水量以及坡度的相互作用对植被NDVI变化的影响存在显著差异; 植被类型与地貌类型对植被NDVI变化也有显著性差异。20%的驱动因子组合对植被NDVI变化的影响差异显著, 其余两两因子组合对植被NDVI的影响差异不显著。

### 2.2.3 自然因子与人为因子的适宜性

基于风险探测模型, 探究了驱动因子的子组之间的植被NDVI均值, 并确定每个驱动因子的合适范围或者类型(图6), 得到有利于植被生长的各因子范围或类别为: 年平均气温4.68–5.67 °C, 年降水

量529.69–547.57 mm, 坡度8°–10°, 土壤类型为淋溶土, 植被类型为针叶林及典型草原, 地貌类型为丘陵及小起伏山地, 人口密度17.64–41.26人·km<sup>-2</sup>, 累计造林面积5.56–7.89 hm<sup>2</sup>·km<sup>-2</sup>, 牲畜密度8.99–70.65头·km<sup>-2</sup>, 农作物种植面积18.89–20.18 hm<sup>2</sup>·km<sup>-2</sup>。

## 3 讨论

### 3.1 自然因子主导植被时空分布

地理探测器驱动因子影响力研究表明, 自然因子对植被NDVI空间分布的影响更大。其中, 土壤类型对研究区植被NDVI影响最为明显, 这与Peng (2019)和Huo & Sun (2021)的结论一致。因为土壤是植物的生长基质, 对植被的空间分布具有非常重要的作用, 尤其在干旱地区(Zhang *et al.*, 2021), 水资源有效性是干旱半干旱地区植被生长的主要限制因素, 而土壤类型对植被生长和雨水再利用效率有显著的影响(刘宪锋等, 2015), 所以土壤类型影响力最大。其次为地貌类型, 是因为地形能够显著影响土壤水分的有效性(Fan *et al.*, 2020)。气温较降水影响力更大, 研究区纬度较高, 春季气温快速回暖有利

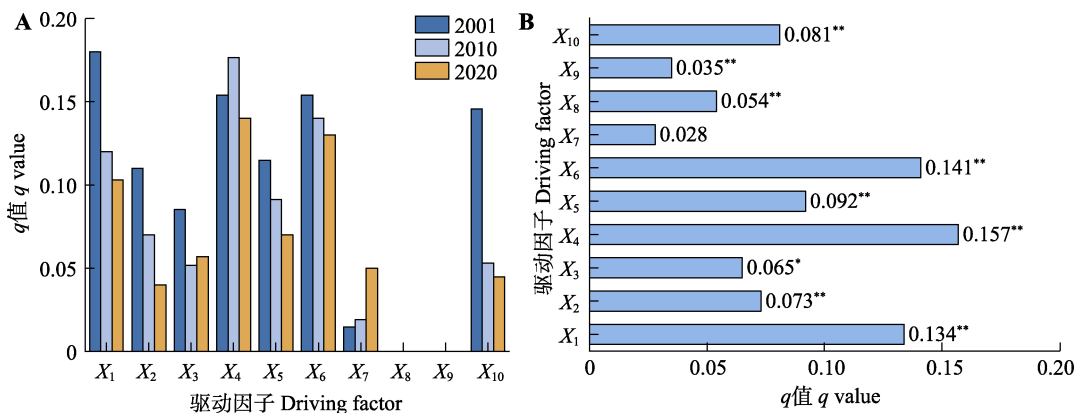


图4 科尔沁沙地驱动因子对归一化植被指数(NDVI)的影响力( $q$ 值)。A, 2001、2010、2020年 $q$ 值。B, 2001–2020年平均 $q$ 值。 $X_1$ – $X_{10}$ , 驱动因子名称, 具体见表3。\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ 。

Fig. 4 Influence of driving factors ( $q$  value) for Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Horqin Sandy Land. A,  $q$  value in 2001, 2010, and 2020. B, Mean value of  $q$  during 2001–2020.  $X_1$ – $X_{10}$ , driving factors' name, see Table 3. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ .

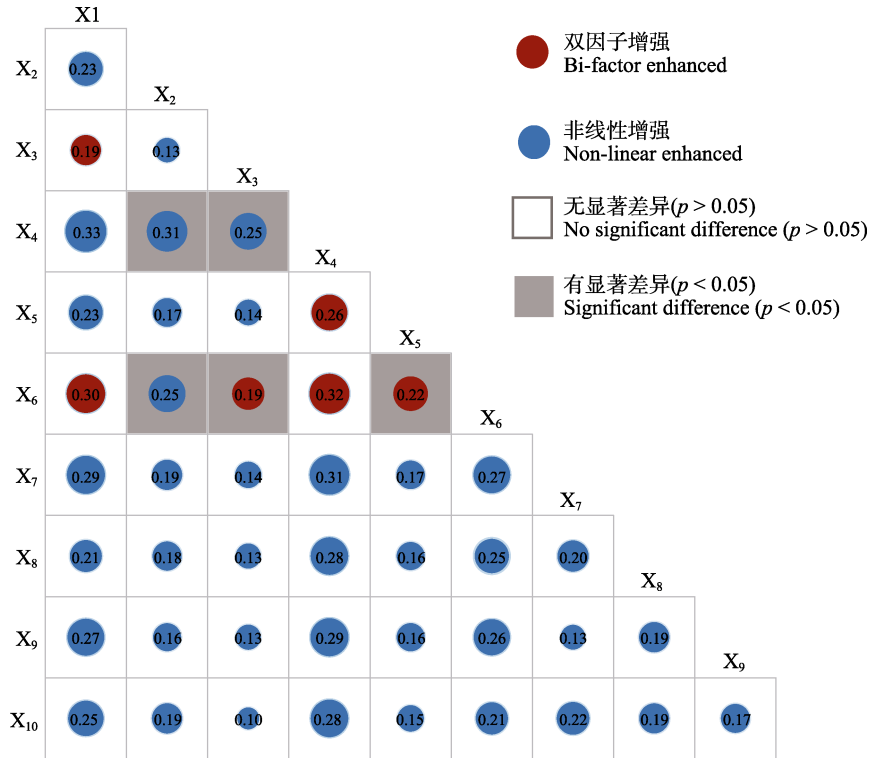


图5 科尔沁沙地驱动因子的交互作用以及显著性差异。X<sub>1</sub>-X<sub>10</sub>, 驱动因子名称, 具体见表3。圆圈尺寸表示交互力大小, 圈中的数字表示交互力的q值。

Fig. 5 Interaction and significant difference of driving factors in Horqin Sandy Land. X<sub>1</sub>-X<sub>10</sub>, driving factors' name, see Table 3. Circle size denotes the magnitude of the interaction, numbers in circle indicates q value of driving factors interaction.

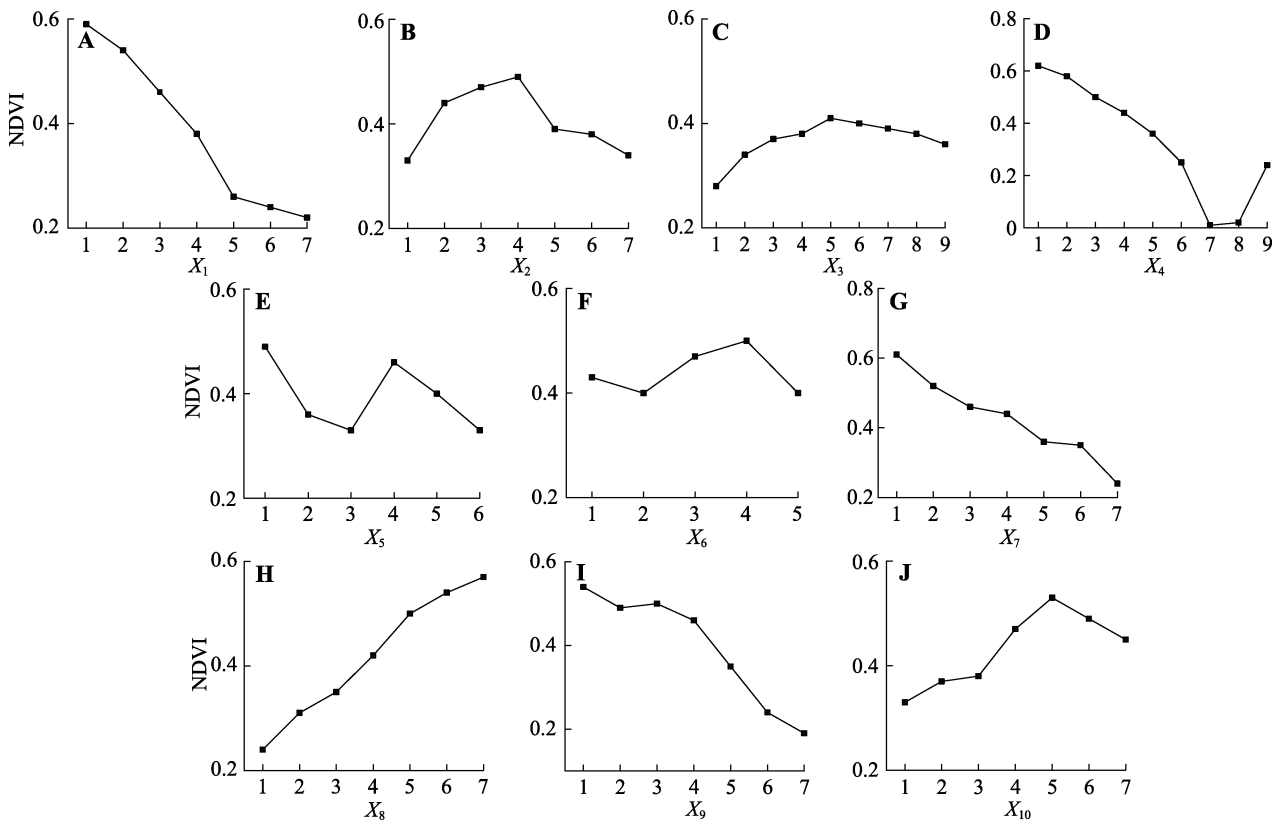


图6 科尔沁沙地归一化植被指数(NDVI)与各驱动因子分级变化。X<sub>1</sub>-X<sub>10</sub>, 驱动因子名称, 具体见表3。

Fig. 6 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) changes with different grades for all driving factors in Horqin Sandy Land. X<sub>1</sub>-X<sub>10</sub>, driving factors' name, see Table 3.



于土壤解冻, 植被才能在有利的地温条件下返青或播种; 到了秋、冬季, 过早降温会导致牧草和林木提前枯黄(张超, 2013)。因此, 相较于降水, 科尔沁沙地植被受气温影响更明显(陈欢和任志远, 2013; 王彦颖, 2016)。

### 3.2 人类活动对植被产生重要影响

人为因子中, 农作物种植面积、累积造林面积对植被的影响较为明显。研究区位于北方农牧交错带, 农牧用地此消彼长的动态变化以及生态恢复工程的实施会显著影响研究区植被NDVI变化(刘孟竹等, 2021)。科尔沁沙地植被NDVI呈逐渐上升趋势, 与国家重视生态系统保护政策密不可分。该地区是国家部署“三北”防护林工程建设重点防治区域, 进入21世纪前后国家实施的生态恢复工程项目, 诸如“退耕还林(草)”计划、“京津风沙源治理工程”、“禁牧禁伐政策”等(Zhang *et al.*, 2012), 在很大程度上促进了科尔沁沙地植被恢复(穆少杰等, 2017)。杜云(2021)对科尔沁沙地土地利用变化研究表明, 2000–2019年该地区耕地面积占比由2000年的8.90%增加到2010年的17.49%, 到2019年达40.21%, 20年来耕地面积增长了近4倍。说明农业的发展和生态工程作用下的植被恢复一定程度上增加了该区域植被覆盖度(肖洋等, 2016)。实际上, 牲畜密度的增加也会造成草地地上生物量减少引起植被覆盖度变化(Zhou *et al.*, 2018), 但由于“禁牧”、“围封”等政策的实施很大程度上降低了放牧强度, 而且科尔沁沙地牲畜分布主要集中在部分以牧业为主的旗县(张思源等, 2020), 因此, 牲畜密度对整个地区植被NDVI影响力较弱。

### 3.3 驱动因子耦合及适宜性范围

在各驱动因子交互作用中, 土壤类型与年平均气温、年降水量、地貌类型等因子的交互作用显著增强了土壤类型对植被NDVI的影响。交互作用最显著的是土壤类型与年平均气温, 因为气温的升高加速了土壤有机质的分解和营养元素的释放, 促进植被加速生长(李净等, 2017)。此外, 土壤类型是多种因素综合影响下变化的客体(刘宪锋等, 2015), 与其他驱动因子都能产生交互作用, 这进一步加强了土壤类型对研究区植被的影响力。虽然科尔沁沙地植被覆盖度逐渐增加, 但研究区生态环境较为脆弱, 仍需科学发展农牧业, 合理布局退耕还草等生态工程, 充分考虑各驱动因子对植被生长影响的适宜范围。

### 3.4 创新与不足

植被动态变化是受控制因素及其之间的相互影响的复杂过程, 以往的研究也充分研究了科尔沁沙地不同时空尺度的植被覆盖变化, 有些以单个因素为主, 比如气象因素(马龙等, 2016; 崔珍珍等, 2021), 地形因素(Fan *et al.*, 2020), 生态工程(Zhang *et al.*, 2012), 也有研究综合考虑了自然因子和人为因子(吕家欣等, 2020; Wang *et al.*, 2021), 但都是以相关性分析和回归分析方法为主, 这些方法适用于连续变量, 更多的是量化局部空间异质性, 关注局部相关性(Losada *et al.*, 2019; Bai *et al.*, 2022)。本研究采用了新的空间统计方法——地理探测器模型量化了科尔沁沙地植被NDVI与各驱动因子之间的关系。地理探测器方法没有线性假设, 形式简洁, 物理意义明确, 可用于测量空间分异、解释因素贡献力以及分析变量之间的相互作用(Wang *et al.*, 2016)。另外, 本研究仍然存在一些局限性和不确定性。考虑的潜在影响因素并不全面, 比如: 土壤水分、水资源可用性、气候滞后效应、干旱时期的降水等更多的生物气候以及社会经济因素应纳入到未来的工作中, 以进一步减少其对植被动态影响的不确定性。

## 4 结论

近20年来, 科尔沁沙地植被NDVI整体呈上升趋势, NDVI恢复区域面积占比超过64.91%, 植被覆盖度高的地区主要分布在科尔沁沙地西北和东部地区。自然因子中土壤类型和地貌类型对研究区植被NDVI影响力最大; 人为因子中农作物种植面积对植被NDVI影响力较高; 各驱动因子交互作用最显著的是土壤类型分别与年平均气温、地貌类型的交互。研究结果得出了该地区适宜植被生长的驱动因子的类型或范围, 为进一步揭示NDVI变化驱动机制以及退化环境恢复和生态环境建设提供理论支持。

### 参考文献

- Bai HX, Li DY, Ge Y, Wang JF, Cao F (2022). Spatial rough set-based geographical detectors for nominal target variables. *Information Sciences*, 586, 525-539.
- Chen H, Ren ZY (2013). The response of vegetation cover in mainland China to precipitation and temperature changes. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 33, 78-82. [陈欢, 任志远 (2013). 中国大陆植被覆盖对降水与温度变化的响应. *水土保持通报*, 33, 78-82.]

- Cui ZZ, Ma C, Chen DK (2021). Spatiotemporal variation of vegetation and climate response in Horqin Sandy land from 1982 to 2015. *Arid Zone Research*, 38, 536-544. [崔珍珍, 马超, 陈登魁 (2021). 1982–2015年科尔沁沙地植被时空变化及气候响应. *干旱区研究*, 38, 536-544.]
- Ding Y, Zhang M, Qian X, Li C, Chen S, Wang W (2018). Using the geographical detector technique to explore the impact of socioeconomic factors on PM<sub>2.5</sub> concentrations in China. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1480-1490.
- Du Y (2021). *Analysis of Land Cover Changes and Driving Factors in Horqin Sandy Land in the Past 20 Years*. Master degree dissertation, Shanghai Normal University, Shanghai. [杜云 (2021). 科尔沁沙地近20年土地覆被变化及驱动因素分析. 硕士学位论文, 上海师范大学, 上海.]
- Fan JQ, Xu Y, Ge HY, Wei Y (2020). Vegetation growth variation in relation to topography in Horqin Sandy Land. *Ecological Indicators*, 113, 106215. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106215.
- Gu Z, Duan X, Shi Y (2018). Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China. *Ecological Indicators*, 93, 54-64.
- Guo ZC, Wei W, Shi PJ, Zhou L, Wang XF, Li ZY, Pang SF, Xie BB (2020). Temporal and spatial patterns of land desertification sensitivity in arid regions of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 75, 154-171. [郭泽呈, 魏伟, 石培基, 周亮, 王旭峰, 李振亚, 庞素菲, 颀斌斌 (2020). 中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局. *地理学报*, 75, 154-171.]
- Han Z, Wang T, Yan C, Liu Y, Liu L, Li A, Du H (2010). Change trends for desertified lands in the Horqin Sandy Land at the beginning of the twenty-first century. *Environmental Earth Sciences*, 59, 1749-1757.
- He B, Chen A, W Jiang, Chen Z (2017). The response of vegetation growth to shifts in trend of temperature in China. *Journal of Geographical Sciences*, 27, 801-816.
- Hein L, Ridder N, Hiernaux P, Leemans R (2011). Desertification in the Sahel: towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images-Science Direct. *Journal of Arid Environments*, 75, 164-1172.
- Hope A, Boynton W, Stow D, Douglas D (2003). Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 3413-3425.
- Huang F, Wang P, Liu XN (2008). Monitoring vegetation dynamic in Horqin sandy-land from spot vegetation time series imagery. *Remote Sensing*, 37, 915-920.
- Huang J, Wang J, Bo Y, Xu C, Hu M, Huang D (2014). Identification of health risks of hand, foot and mouth disease in China using the geographical detector technique. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 11, 3407-3423.
- Huo H, Sun CP (2021). Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: a case study of the northwestern Yunnan Plateau, China. *Ecological Indicators*, 130, 108005. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108005.
- Li J, Liu HB, Li CY, Li L (2017). Research on the beginning period of vegetation growth season in northern China based on GIMMS 3g NDVI in the past 30 years. *Chinese Journal of Geography*, 37, 620-629. [李净, 刘红兵, 李彩云, 李龙 (2017). 基于GIMMS 3g NDVI的近30年中国北部植被生长季始期变化研究. *地理科学*, 37, 620-629.]
- Li SY, Wang XQ, Li B (2016). Spatio-temporal changes of vegetation coverage in Horqin District based on MODIS data. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 33(2), 122-126. [李生勇, 王晓卿, 李彪 (2016). 基于MODIS数据的科尔沁区植被覆盖时空变化分析. *长江科学院院报*, 33(2), 122-126.]
- Liu MZ, Wang YF, Pei HW (2021). Changes in land use and carbon storage in the agro-pastoral ecotone of northern China under the background of returning farmland to forest (grass). *Journal of Desert Research*, 41(1), 174-182. [刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟 (2021). 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化. *中国沙漠*, 41(1), 174-182.]
- Liu N, Peng SZ, Chen YM (2021). Temporal effects of climate factors on vegetation growth in the Qingzang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 1-9. [刘宁, 彭守璋, 陈云明 (2021). 气候因子对青藏高原植被生长的时间效应研究. *植物生态学报*, 45, 1-9.]
- Liu XF, Zhu XF, Pan YZ, Li YZ, Zhao AZ (2015). Characteristics of temporal and spatial changes of vegetation cover in China from 1982 to 2012. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5331-5342. [刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周 (2015). 1982–2012年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 35, 5331-5342.]
- Liu Z, Liu Y, Li Y (2018). Anthropogenic contributions dominate trends of vegetation cover change over the farming-pastoral ecotone of northern China. *Ecological Indicators*, 95, 370-378.
- Losada N, Alen E, Cotos T (2019). Spatial heterogeneity in Spain for senior travel behavior. *Tourism Management*, 70, 444-452.
- Lu J, Zhan BL, Xu GC, Ren ZP, Li P (2020). Dynamic change of vegetation and its response to climate and topographic factors in the Xijiang River basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 11637-11648.
- Luo XL, Li YG, Yin H, Sui M (2020). The response of vegetation NDVI in Northeast China to SPEI at different time scales. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 412-421. [罗新兰, 李英歌, 殷红, 隋明 (2020). 东北地区植被NDVI

- 对不同时间尺度SPEI的响应. 生态学杂志, 39, 412-421.]
- Lv JX, Li XF, Zheng X, Nie Z, Liu SQ (2020). Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation in Horqin Sandy Land in the past 40 years. *Journal of Ecology*, 39, 3-12. [吕家欣, 李秀芬, 郑晓, 聂哲, 刘思婧 (2020). 近40年科尔沁沙地植被时空变化及其驱动力. 生态学杂志, 39, 3-12.]
- Ma L, Wang JR, Liu XT, Huang X, Liu DH, Li YH (2016). Response relationship between vegetation and climate factors in Horgin Sandy Land from 2000 to 2012. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 47(4), 162-172. [马龙, 王静茹, 刘廷玺, 黄星, 刘丹辉, 李虹雨 (2016). 2000-2012年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系. 农业机械学报, 47(4), 162-172.]
- Mu SJ, Zhu C, Zhou KX, Li JL (2017). Research on grassland degradation control countermeasures and ways of increasing carbon sinks in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 25, 217-225. [穆少杰, 朱超, 周可新, 李建龙 (2017). 内蒙古草地退化防治对策及碳增汇途径研究. 草地学报, 25, 217-225.]
- Parmesan C, Yohe G (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Peng W, Kuang T, Tao S (2019). Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China. *Journal of Cleaner Production*, 56, 233-245.
- Peng WF, Wang GJ, Zhou JM, Xu XL, Luo HL, Zhao JF, Yang JC (2016). Dynamic monitoring of vegetation coverage in the Wenchuan-Dujiang Weir section of the Minjiang River based on multi-temporal Landsat 5/8 images. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 1975-1988. [彭文甫, 王广杰, 周介铭, 徐新良, 罗怀良, 赵景峰, 杨存建 (2016). 基于多时相Landsat5/8影像的岷江汶川-都江堰段植被覆盖动态监测. 生态学报, 36, 1975-1988.]
- Song Y, Wang J, Ge Y, Xu C (2020). An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 57, 593-610.
- Wang J, Wang K, Zhang M, Zhang C (2015). Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China. *Ecological Engineering*, 81, 451-461.
- Wang JF, Xu CD (2017). Geodetector: principles and prospects. *Acta Geographica Sinica*, 72, 116-134. [王劲峰, 徐成东 (2017). 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72, 116-134.]
- Wang JF, Zhang TL, Fu BJ (2016). A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 67, 250-256.
- Wang T (2003). *Desert and Desertification in China*. Hebei Science and Technology Publishing House, Shijiazhuang. [王涛 (2003). 中国沙漠与沙漠化. 河北科技出版社, 石家庄.]
- Wang WH, Ma XQ, Zou XH, Tian C, Jin QF, Guo FT (2017). Spatiotemporal evolution characteristics of vegetation coverage in Fujian Province from 2000 to 2010. *Research of Soil and Water Conservation*, 33, 23-35. [王文辉, 马祥庆, 邹显花, 田超, 靳全峰, 郭福涛 (2017). 2000-2010年福建省植被覆盖度的时空演变特征. 水土保持研究, 33, 23-35.]
- Wang X, Chen F, Hasi E, Li J (2008). Desertification in China: an assessment. *Earth-Science Reviews*, 88, 188-206.
- Wang X, Li Y, Wang XY (2021). Temporal and spatial variations in NDVI and analysis of the driving factors in the desertified areas of northern China from 1998 to 2015. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 633020. DOI: 10.3389/fenvs.2021.633020.
- Wang YY (2016). *Research on the Temporal and Spatial Dynamic Changes of Vegetation in Northeast China and Its Response to Climate*. PhD dissertation, Northeast Normal University, Changchun. [王彦颖 (2016). 中国东北植被时空动态变化及其对气候响应研究. 博士学位论文, 东北师范大学, 长春.]
- Wei FL, Liu TX, Zhang SW, Ding L, Cui DX, Zhao ZF (2012). Vegetation cover change in Horqin Sandy Land and its relationship with climate factors. *Research of Soil and Water Conservation*, 19, 254-258. [魏丰良, 刘廷玺, 张圣微, 丁磊, 崔德新, 赵泽锋 (2012). 科尔沁沙地植被覆盖变化及其与气候因子的关系研究. 水土保持研究, 19, 254-258.]
- Wei FY (2007). *The Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology*. Beijing Metrology Press, Beijing. [魏凤英 (2007). 现代气候统计诊断预测技术. 北京气象出版社, 北京.]
- Xiao Y, Ouyang ZY, Wang LY, Rao EM, Jiang L, Zhang L (2016). Ecosystem quality spatial characteristics and driving forces in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 6019-6030. [肖洋, 欧阳志云, 王莉雁, 饶恩明, 江凌, 张路 (2016). 内蒙古生态系统质量空间特征及其驱动力. 生态学报, 36, 6019-6030.]
- Zhang C (2013). *Vegetation Cover Change in Inner Mongolia and Its Relationship with Regional Climate*. Master degree dissertation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing. [张超 (2013). 内蒙古植被覆盖变化及其与区域气候相互关系. 硕士学位论文, 南京信息工程大学, 南京.]
- Zhang G, Dong J, Xiao X, Hu Z, Sheldon S (2012). Effectiveness of ecological restoration projects in Horqin Sandy Land, China, based on SPOT-VGT NDVI data. *Ecological Engineering*, 38, 20-29.
- Zhang H, Li M, Song JY, Han HW (2021). Analysis of driving factors of vegetation NDVI changes in Qilian Mountain National Park based on geographic detectors. *Chinese Journal of Ecology*, 40, 2530-2540. [张华, 李明, 宋金岳,

- 韩宏武 (2021). 基于地理探测器的祁连山国家公园植被NDVI变化驱动因素分析. *生态学杂志*, 40, 2530-2540.]
- Zhang SY, Nie Y, Zhang HY, Li YL, Han YD, Liu XH, Wang B (2020). Analysis of spatial and temporal changes and driving forces of vegetation NDVI in Inner Mongolia based on geographic detectors. *Acta Agrestia Sinica*, 28, 1460-1472. [张思源, 聂莹, 张海燕, 李永利, 韩燕东, 刘晓煌, 王兵 (2020). 基于地理探测器的内蒙古植被NDVI时空变化与驱动力分析. *草地学报*, 28, 1460-1472.]
- Zhang X, Wang J, Gao Y, Wang LX (2021). Variations and controlling factors of vegetation dynamics on the Qingzang Plateau of China over the recent 20 years. *Geography and Sustainability*, 2, 74-95.
- Zhao HL, Dahei JZ, Zhou RL, Li YL, Zuo XA, Huang G (2008). The impact of human activities and climate change on the vegetation of sandy grassland in Horqin. *Advances in Earth Science*, 4, 408-414. [赵哈林, 大黑俊哉, 周瑞莲, 李玉霖, 左小安, 黄刚 (2008). 人类活动与气候变化对科尔沁沙质草地植被的影响. *地球科学进展*, 4, 408-414.]
- Zhou D, Zhao X, Hu H, Shen H, Fang J (2015). Long-term vegetation changes in the four mega-sandy lands in Inner Mongolia, China. *Landscape Ecology*, 30, 1613-1626.
- Zhou X, Yamaguchi Y, Arjasakusuma S (2018). Distinguishing the vegetation dynamics induced by anthropogenic factors using vegetation optical depth and AVHRR NDVI: a cross-border study on the Mongolian Plateau. *Science of the Total Environment*, 616, 730-743.
- Zhu L, Meng J, Zhu L (2020). Applying geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin. *Ecological Indicators*, 117, 106545. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106545.

责任编辑: 梁存柱 责任编辑: 乔鲜果