

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏

**Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia**

GAO Mengmeng, LIU Qiong, WANG Yi, LI Xiaolei, and SHI Peng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104046

高萌萌, 刘琼, 王轶, 等. 内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 175-182.  
GAO Mengmeng, LIU Qiong, WANG Yi, *et al.* Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 175-182.

## 内蒙古西辽河平原植被指数时空变化 及其影响因素研究

高萌萌<sup>1</sup>, 刘 琼<sup>1</sup>, 王 轶<sup>1</sup>, 李小磊<sup>1</sup>, 石 鹏<sup>2</sup>

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 内蒙古地质环境监测院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 西辽河平原位于我国北方农牧交错带, 属半干旱气候, 发育科尔沁沙地, 生态环境极其脆弱, 开展植被指数时空变化及其影响因素研究, 对于预测土地退化风险意义重大, 可为该流域生态环境保护治理及水资源合理开发利用提供技术支持。利用 2000—2019 年 MODIS NDVI 数据, 采用一元线性回归趋势法和 Mann-Kendall 检验分析了近 20 年来该地区的植被生长变化趋势及突变情况。从影响植被生长的水热条件出发, 分析了 NDVI 值与气象因素(降水、气温)、土壤湿度、地下水埋深等因子的相关关系; 结合人类活动, 分析了土地利用类型变化对 NDVI 值的影响。结果表明: (1)2000—2019 年生长季 NDVI 值整体呈上升趋势, 不存在显著突变点, 最高值 0.56, 最低值 0.41。(2)NDVI 值在空间上呈现“东高西低”的分布特征, 不同用地类型的 NDVI 值由大到小依次为耕地>林地>沼泽地>滩地>草地>盐碱地>沙地。(3)92.5% 的区域植被呈增长趋势, 7.5% 的区域植被呈减少趋势。(4)NDVI 值与降水、气温、土壤湿度呈正相关关系, 相关系数分别为 0.86, 0.78, 0.81, 降水对植被影响最大。(5)最适宜天然植被生长的地下水埋深约为 3 m, 当地下水埋深大于 10 m 时, NDVI 值会随着埋深的增加剧烈减小。(6)人类活动如土地开垦、植树造林是近 20 年来 NDVI 值呈增加趋势的主要原因之一, 在一定程度上改善了当地生态环境。  
**关键词:** 归一化差值植被指数; 变化趋势; 气温; 降水; 土壤湿度; 地下水埋深; 土地利用

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0175-08

## Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia

GAO Mengmeng<sup>1</sup>, LIU Qiong<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, LI Xiaolei<sup>1</sup>, SHI Peng<sup>2</sup>

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

2. Inner Mongolia Institute of Geological Environmental Monitoring, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

**Abstract:** The West Liaohe Plain is located in the farming-pasturing ecotone in North China, which lies in the semi-arid region, including the Kerqin Sandy Land, where the ecological environment is extremely fragile. It is of great significance to study the spatio-temporal variation in vegetation index and its influencing factors for predicting the risk of land degradation, which can provide technical support for the protection and management of ecological environment and the rational development and utilization of water resources in the watershed. In this

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-06-17

投稿网址: [www.swdgedz.com](http://www.swdgedz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702386); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190506; DD20160328); 三峡库区地质环境监测与灾害预警重庆市重点实验室开放基金项目(ZD2020A0303); 福建省农业生态过程与安全监控重点实验室(福建农林大学)开放基金项目(NYST-2020-02)

第一作者: 高萌萌(1989-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事生态水文地质研究工作。E-mail: [592922470@qq.com](mailto:592922470@qq.com)

通讯作者: 刘琼(1986-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事环境地质研究工作。E-mail: [151796630@qq.com](mailto:151796630@qq.com)

paper, based on the MODIS NDVI data from 2000 to 2019, the univariate linear regression trend method and Mann-Kendall test are used to analyze the vegetation growth trend and mutation in this area in the past 20 years. Considering the water and heat conditions affecting vegetation growth, the correlations between *NDVI* and meteorological factors (precipitation, air temperature), soil moisture, groundwater depth and other factors are analyzed. In addition, combined with human activities, the impact of land use type change on *NDVI* is analyzed. The results indicate that (1) the *NDVI* during the vegetation growing season from 2000 to 2019 shows an overall upward trend, with no significant abrupt change points, the highest value is 0.56 and the lowest value is 0.41. (2) *NDVI* presents a spatial distribution characteristic of “high in the east and low in the west”. The *NDVI* of different land use types are in the descending order: cultivated land > forest land > swamp land > flood plain > grassland > saline land > sandy land. (3) The 92.5% of the area shows an increasing trend, and the 7.5% of the area shows a decreasing trend. (4) *NDVI* is positively correlated with precipitation, temperature and soil moisture, with correlation coefficients of 0.86, 0.80 and 0.81, respectively and precipitation has a greater impact on vegetation. (5) The most suitable groundwater level depth for natural vegetation growth is about 3 m, and when the groundwater level depth is more than 10 m, *NDVI* will decrease sharply with the increasing groundwater level depth. (6) Human activities such as land reclamation and afforestation are the main reasons for the increasing trend of *NDVI* in recent 20 years, which improves the ecological environment to a certain extent.

**Keywords:** NDVI; trend; air temperature; precipitation; soil moisture; groundwater depth; land use

植被是生态系统的重要组成部分,是全球陆地生态系统变化和生态环境演化的重要指示因子<sup>[1-3]</sup>,对水平衡、地球表面能量交换和生物地球化学循环至关重要<sup>[4-5]</sup>。植被生长既取决于植被类型本身的特性,也受光热条件、水分、土壤的影响。光热条件与气温密切相关<sup>[6]</sup>。水分的影响较为复杂,由于地下水—土壤—植被—大气间的水分迁移是连续过程<sup>[7]</sup>,植被生长同时受地下水、土壤水和大气降水等因子的影响。在干旱半干旱区,以灌木、草地、森林及农田等多种形式存在的多样化植被系统有助于保持土壤及水分,监测其长期动态变化,并研究植被演化与气候、水分等相关关系,对于预测土地退化风险意义重大。

目前从区域尺度研究干旱半干旱区植被演化及其影响因子相关性分析的主要手段是遥感技术。Fabricante 等<sup>[8]</sup>研究了巴塔哥尼亚北部草原植被指数与降水的关系,认为干旱的生态系统中,*NDVI*对降水之间存在滞后响应;Khan 等<sup>[9]</sup>研究了巴基斯坦及其邻近南亚国家植被生长对当前气候变化的相应,认为*NDVI*值变化取决于土地覆盖类型及降雨量。国内相关研究主要集中在柴达木盆地、鄂尔多斯高原、黑河流域等西北干旱半干旱地区。杨泽元等<sup>[10]</sup>研究了陕北风沙滩地区植被生长与地下水位埋深的关系,确定了风沙滩地区生态安全水位埋深为 1.5~5 m;张二勇等<sup>[11]</sup>定量研究了鄂尔多斯盆地内蒙古能源基地生态植

被与地下水关系,分析了低湿植被、低湿植被与沙地植被过渡区的水位埋深阈值分别为 3, 4.8 m;金晓媚等<sup>[12-13]</sup>分析了海流兔河流域和柴达木盆地植被与地下水位、气象因子、地形地貌之间的关系,认为不同植被类型对地下水依赖性大;王旭升等<sup>[14]</sup>研究了鄂尔多斯高原植被盖度与浅层地下水的依赖关系,认为植被盖度同时受气候条件和地下水的影响;赵捷等<sup>[15]</sup>研究了黑河上中游流域长序列植被盖度数据,认为植被受气温的影响大于降水,而对降水的响应更为迅速;李元春等<sup>[16]</sup>在甘南和川西北地区基于植被 *NDVI* 值分析了草地植被变化趋势及驱动因素,认为温度和降水对研究区草地 *NDVI* 值的变化主要呈正向驱动,且 *NDVI* 值与温度呈正相关的面积大于降水。

西辽河平原位于内蒙古东部平原,属中温带半干旱区的农牧交错带。平原西部广泛分布风积沙地、沙丘,是我国半干旱区典型的由沙漠向草原过渡的荒漠化草原区。目前有关西辽河平原的植被演化及其与环境因子的定量关系研究较少,影响因子考虑不够全面。本文基于 2000—2019 年 16 天合成的 MODIS *NDVI* 数据,分析了该研究区近 20 年来植被生长变化趋势,并从影响植被生长的水热条件出发,开展 *NDVI* 与气象因素(降水、气温)、土壤湿度、地下水埋深等因子的定量关系研究,为该流域生态环境保护治理及水资源合理开发利用提供技术支撑。

## 1 研究区概况

西辽河平原地势平坦开阔,由西南向东北逐渐倾斜,主要地貌单元为河谷冲击平原和风积沙丘。北部主要为草原牧区,中部及南侧边缘为农区,沙地主要分布在西南部,面积约  $5.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该地区多年平均降水量 375 mm,多年平均蒸发量 1 900 mm,降水主要集中在 6—9 月。区内天然植被主要有沙蒿、沙柳、苔草、芨芨草、柠条等,受水热条件影响,生长季为 6—9 月。主要过境河流有西辽河及新开河,1999 年断流至今。自 20 世纪 60 年代起,地下水开采致使沙地周边的地下水水位下降,植被生长受到影响,荒漠化程度加重。近年来经过全面综合治理,该区域内沙地面积逐渐变小,生态环境持续向好发展。

## 2 研究数据及方法

### 2.1 数据及处理

#### (1) 遥感数据及预处理

归一化差值植被指数 (*NDVI*, normalized difference vegetation index) 是目前广泛应用于反映植被生长状况的指标<sup>[17-20]</sup>, *NDVI* 值越大,说明植被生长状况越好, *NDVI* 值越小,说明植被生长状况越差。 *NDVI* 数据可直接从 MOD13Q1 遥感数据中提取,数据来源于美国 NASA 网 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),空间分辨率 250 m,时间分辨率 16 d,数据时间为 2000—2019 年。覆盖研究区需要 4 幅,2000—2019 年 1—12 月共 1 236 幅。在 MRT 软件中提取 *NDVI* 后进行投影转换,为了消除云、大气及太阳高度角的影响,采用最大值合成法对每个月的 *NDVI* 数据进行处理,即求取当月各栅格的最大值。

#### (2) 地下水水位埋深和气象数据

西辽河平原地下水埋深数据采用 2019 年国家级地下水监测工程监测数据,监测频率为 1 次/h,研究区内及周边地下水监测井共 125 个。气象数据来源于中国气象数据共享网,西辽河平原内及周边气象站站点共 9 个,获取 2000—2019 年月均降水量、温度等相关指标。监测井和气象站点位置见图 1。

#### (3) 土壤湿度数据

GLDAS (the Global Land Data Assimilation System) 是美国航天局 NASA 提供的全球尺度的陆面同化数据集,包含了全球降雨量、水分蒸发量、地表径流、地下径流、土壤湿度、地表积雪的分布以及温度和热流分布等数据。本文选取 GLDAS NOAH 模型中土壤湿度

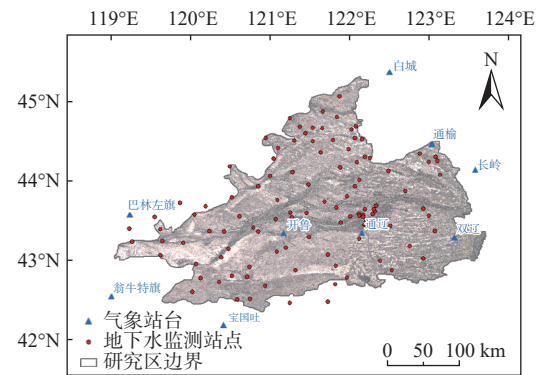


图 1 研究区气象站点和地下水监测站点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and groundwater monitoring stations in the study area

月解数据,分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。本文选用 0~10 cm 表层土壤湿度数据,单位为  $\text{kg}/\text{m}^2$ 。

#### (3) 土地利用数据

土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心,本文选取 2000 年和 2018 年的土地利用类型数据,该数据是基于 Landsat 8 遥感影像,通过人工目视解译生成,数据类型是 1 km 栅格。通过重分类,将研究区土地利用数据分为 10 类,分别是耕地、草地、建设用地、沙地、沼泽地、林地、水域、滩地、盐碱地和裸土地(图 2)。

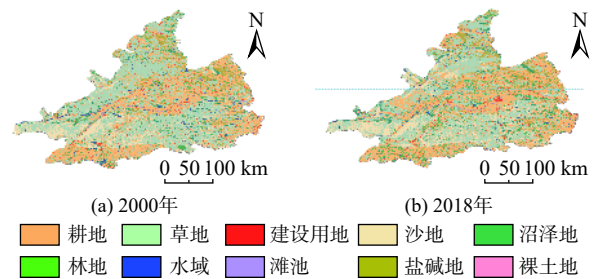


图 2 2000 年和 2018 年研究区土地利用类型分布图

Fig. 2 Distribution of land use types in the study area in 2000 and 2018

### 2.2 研究方法

#### (1) 一元线性回归趋势法

用一元线性回归趋势分析方法分析研究区的植被变化趋势,即对 2000—2019 年的生长季(6—9 月份)平均 *NDVI* 值求斜率,模拟每一个栅格的变化趋势:

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

式中:  $n$ ——样本的数量,  $n=20$ ;

$i$ ——年序号,  $i$  的取值 1, 2, ..., 20;

$NDVI_i$ ——第*i*年的  $NDVI$  值;

$Slope$ ——2000—2019 年每年平均  $NDVI$  的线性回归率。

计算得到的斜率值可以反映在 20 年的时间序列中,研究区平均  $NDVI$  值的变化趋势,每个像元点的  $slope$  值均代表该点 20 年的变化趋势。若  $slope > 0$ , 说明  $NDVI$  增加,植被呈增长趋势,植被状况变好;若  $slope = 0$ , 说明  $NDVI$  不变,植被基本无变化;若  $slope < 0$ , 说明  $NDVI$  减小,植被呈减小趋势,植被状况变差。

### (2) Mann-Kendall 突变检测

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法,不受少数异常值干扰,且不需要样本遵从一定的分布,被广泛应用于突变检测<sup>[21-23]</sup>。本文利用该方法检测  $NDVI$  变化过程中的突变点,检测方法为:

根据西辽河平原年均  $NDVI$  时间序列  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其秩序列为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i < x_j \end{cases}, j = 1, 2, \dots, i \quad (3)$$

定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E[S_k]}{\sqrt{Var[S_k]}} \quad (4)$$

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (5)$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6)$$

式中:  $E(S_k)$ —— $S_k$  的均值;

$Var(S_k)$ —— $S_k$  的方差。

$UF_k$  计算结果组成  $UF$  曲线,同样以此方法引用到反序列中,计算得到  $UB_k$ ,使得  $UB_k = -UF_k (k=1, 2, \dots, n)$ 。若  $UF_k$  和  $UB_k$  的值大于 0, 表明序列呈上升趋势,反之呈下降趋势。当曲线超出置信度区间时,表明上升或下降趋势显著。如果  $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么该点即为突变点。

### (3) 相关性分析法

对西辽河平原植被  $NDVI$  与气象因子(降水、温度、湿度)的相关性进行分析,相关性系数  $r_{xy}$  为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (8)$$

式中:  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ ——因子样本值的平均值。

$r_{xy}$  是因子  $x$  和  $y$  之间的相关系数,表示两因子相关性的统计指标,该指标的取值区间为  $[-1, 1]$ , 且  $r_{xy} > 0$  为正相关,  $r_{xy}$  的绝对值越大,表明  $x$  和  $y$  的相关性越密切。

## 3 结果与讨论

### 3.1 植被时空变化特征

#### 3.1.1 植被随时间变化趋势

分析 2000—2019 年每年生长季的全域  $NDVI$  均值表明,西辽河平原植被  $NDVI$  值整体表现出波动升高的趋势,该时段内  $NDVI$  值变化大致分为 3 个阶段:2000—2005 年  $NDVI$  值呈较平稳的上升趋势,2006—2012 年  $NDVI$  值上下起伏变化较大,整体处于上升趋势,2013—2019 年  $NDVI$  值呈平稳的上升趋势(图 3)。2007 年植被  $NDVI$  值达到极小值 0.41, 2019 年植被  $NDVI$  值达到最大值 0.56。对 2000—2019 年年均  $NDVI$  值进行 Mann-Kendall 突变检验,  $UF$  值始终大于 0, 表明 20 年来  $NDVI$  值呈上升趋势。2012 年  $UF$  曲线超出置信区间,说明 2012 年之前由于震荡较大,上升趋势不显著,2012 年之后呈显著上升趋势。 $UF$  和  $UB$  统计量相交于 2014 年,但由于交点不在置信区间范围内,因此  $NDVI$  值不存在显著突变点(图 4)。

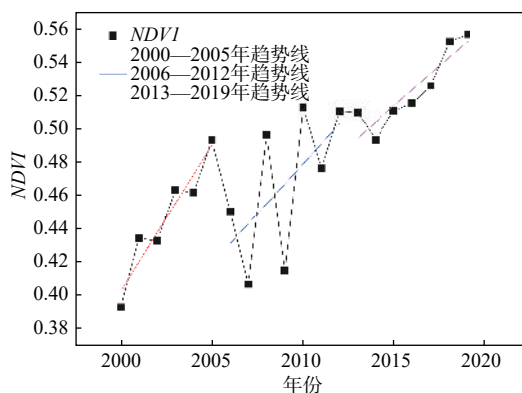


图 3 研究区 2000—2019 年  $NDVI$  年际变化趋势图  
Fig. 3 Interannual variation trend of  $NDVI$  in the study area from 2000 to 2019

#### 3.1.2 植被空间分布特征及变化趋势

研究区 2000—2019 年生长季的  $NDVI$  值求平均值,得到西辽河平原 20 年来平均  $NDVI$  的空间分布图,见图 5(a)。西辽河平原  $NDVI$  在空间上呈现“东高西低”的分布特征,结合土地利用类型,  $NDVI$  值较大

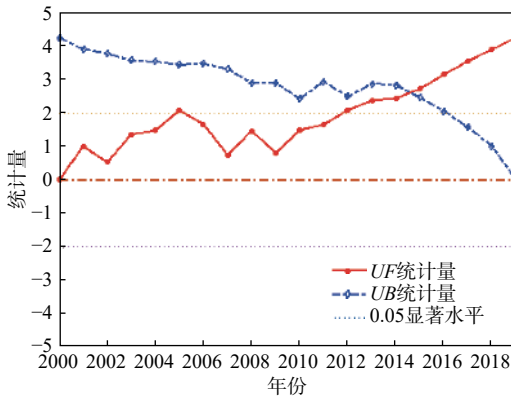


图 4 研究区 NDVI 值突变检验曲线图

Fig. 4 Mutation test curve of NDVI in the study area

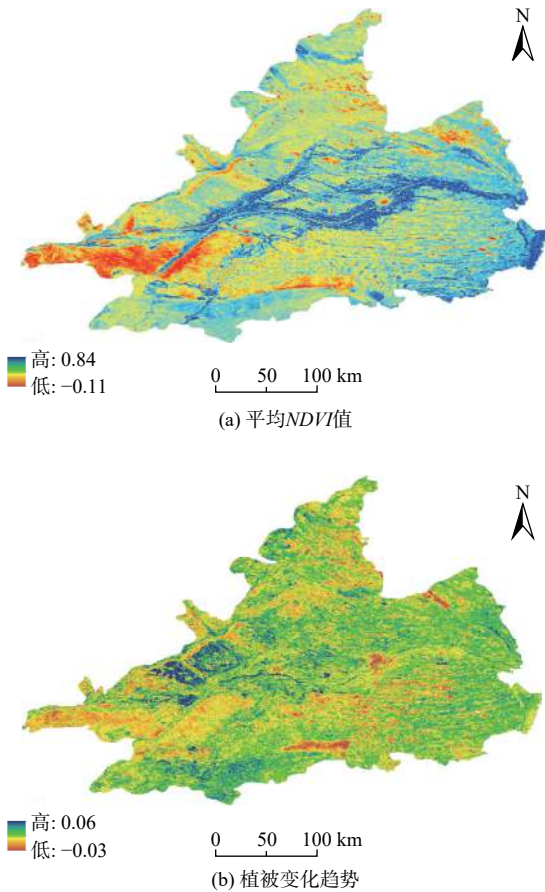


图 5 研究区 2000—2019 年平均 NDVI 值和植被变化趋势分布图

Fig. 5 Spatial distribution maps of NDVI and variation trends of vegetation in the study area during 2000—2019

的区域分布在平原中部的西辽河、新开河沿岸地带以及平原东南部地区, 主要地类是耕地。NDVI 值较小的区域主要分布在研究区西部及北部的科尔沁沙地, 主要地类是沙地。不同地类的 NDVI 值由大到小依次为耕地>林地>沼泽地>滩地>草地>盐碱地>沙地, 且随季节变化趋势一致, 夏季>秋季>春季>冬季(图 6)。

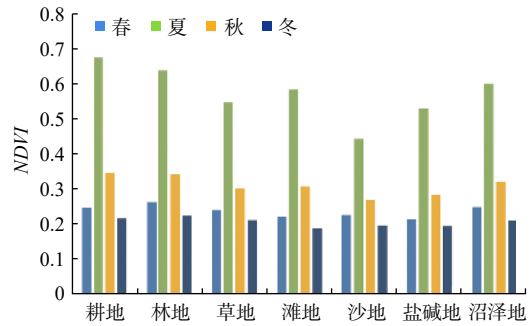


图 6 研究区不同土地利用类型 NDVI 值随季节变化趋势图

Fig. 6 Seasonal variation trend of NDVI of different land use types in the study area from 2000 to 2019

分析研究区 2000—2019 年生长季平均 NDVI 值一元线性回归趋势(式 1), 得到 2000—2019 年 NDVI 值变化趋势分布图, 见图 5(b), 研究区内大部分地区植被呈增长趋势, 面积占比约 92.5%, 小部分地区植被呈减少趋势, 面积占比约 7.5%。结合用地类型分析可知, 草地是植被减少的主力区域, 说明草地退化较为明显。

### 3.2 气候对植被的影响

本文对研究区 20 年来月均气象数据(降水量、气温)和相应的全域 NDVI 月均值进行相关性分析, 见图 7(a)(b)。结果表明: 研究区 NDVI 值与降水量呈正相关关系, 相关系数  $r=0.86$ , NDVI 值随降水量的增加而升高。而 NDVI 值与气温的相关关系具有分段特点, 当气温在  $10^{\circ}\text{C}$  以下, NDVI 值趋于水平无明显变化, 在 0.2 上下浮动; 当气温大于  $10^{\circ}\text{C}$  时, 随着温度的升高 NDVI 值呈增大趋势。通过 NDVI 值和气温的线性拟合, 二者呈正相关关系, 相关系数  $r=0.78$ 。

### 3.3 土壤湿度对植被的影响

植被生长状况与土壤水分条件有关, 土壤湿度在陆地表面的水文过程中起着至关重要的作用, 表层土壤湿度湿化还是干化与植被的绿化还是恶化之间存在相关关系<sup>[24]</sup>。分析研究区内 2000—2019 年月均 NDVI 值及对应月份 0~10cm 土壤湿度的相关性, 见图 7(c)。结果显示: NDVI 值随表层土壤湿度的增加而增大, 存在较强正相关关系,  $r=0.81$ 。

### 3.4 地下水埋深对植被的影响

本文利用研究区及周边 125 个地下水潜水监测井的 2019 年 6 月监测数据, 与对应的 NDVI 值进行相关性分析。研究区处在农牧交错带, 耕地和牧草地主要靠抽地下水进行灌溉, 因此生长季植被指数最高的耕地, 地下水埋深反而最大。为了消除人为抽水因素影响, 本文选择研究区内的天然植被区, 研究植被与

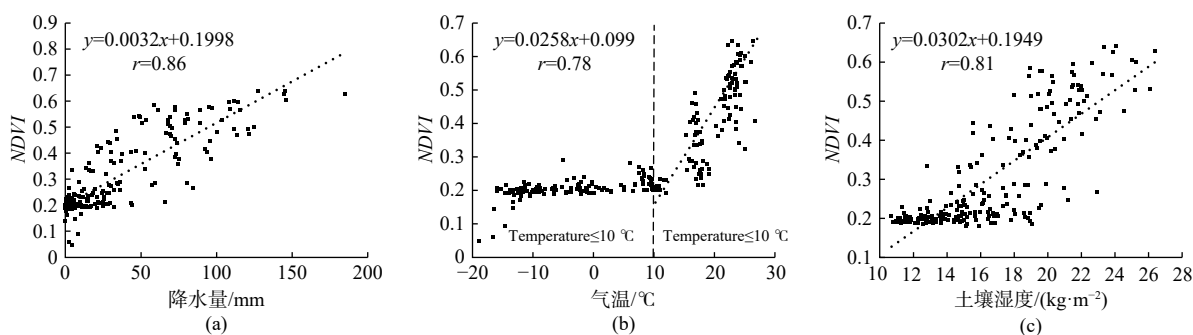


图 7 研究区 NDVI 值与降水量、气温、表层土壤湿度的相关性分析

Fig. 7 Correlation of NDVI with precipitation, air temperature and surface soil moisture in the study area

地下水埋深的关系。

6 月天然植被区地下水埋深为 0~17.45 m, 将地下水埋深以 0.2 m 为步长, 统计每个步长对应的 NDVI 平均值, 生成 NDVI 值随地下水埋深变化趋势图(图 8)。地下水埋深为 0~4 m 时, NDVI 值随埋深的增加而增大; 地下水埋深 4~10 m 时, NDVI 值趋于稳定, 在 0.4 上下浮动; 地下水埋深大于 10 m 时, NDVI 值随埋深的增加而急剧减小。NDVI 值在地下水埋深 3 m 左右达到最大值 0.43。

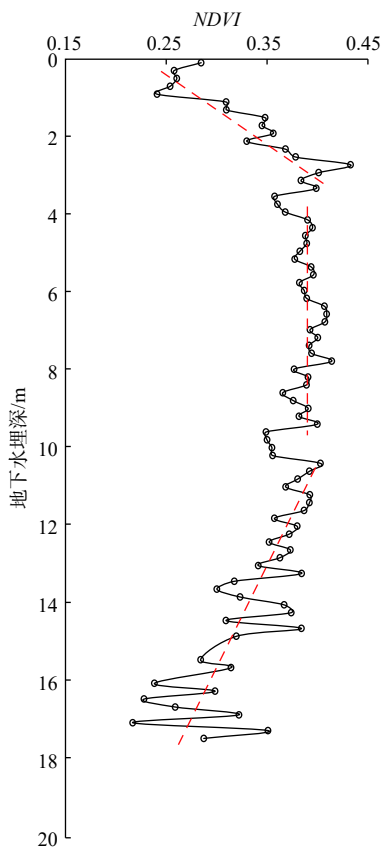


图 8 研究区天然植被 NDVI 值和地下水埋深关系图

Fig. 8 Relationship between NDVI of natural vegetation and groundwater level depth in the study area

西辽河平原降水主要集中在植被生长季, 因此降水对该地区植被生长有很重要的影响。本文在讨论生长季植被与地下水埋深相关性时, 没有排除降水对植被生长的影响。降水和地下水对植被的双重影响机制还需要进一步研究。

### 3.5 人类活动对植被的影响

人类活动如土地开垦、植树造林、城市扩张等, 通过改变土地利用类型, 对地表植被分布和变化趋势产生明显的影响。

本文统计了研究区 2000 年和 2018 年不同土地利用类型的面积及变化(表 1)。结果显示, 耕地、林地面积显著增加, 分别增加了 1 873, 1 312 km<sup>2</sup>, 草地和水域面积显著减小, 分别减小了 4 187, 583 km<sup>2</sup>。结合近 20 年来 NDVI 值的变化趋势, 耕地和林地面积的显著增加是 NDVI 值整体呈增加趋势的主要原因之一, 说明耕地开垦及植树造林在一定程度上改善了当地的生态环境。但是由于耕地面积增加, 会导致灌溉需水量增加, 地下水位降低, 草地和水域面积呈减少趋势, 不利于形成生态环境改善的良性循环。

表 1 研究区 2000 和 2018 年土地利用类型面积统计  
Table 1 Area of different land use types in the study area in 2000 and 2018 /km<sup>2</sup>

地类	2000年	2018年	变化
耕地	17 186	19 059	1 873
林地	2 173	3 485	1 312
草地	24 060	19 873	-4 187
水域	1 152	569	-583
建设用地	1 303	1 521	218
滩地	306	471	165
沙地	6 199	7 066	867
盐碱地	3 273	3 053	-220
沼泽地	1 967	2 518	551
裸土地	3	7	4
总计	57 622	57 622	0

## 4 结论

(1)研究区 20 年来全域 *NDVI* 均值整体呈增加趋势,表明植被生长变好,最高值 0.56,最低值 0.41。在空间上呈现“东高西低”的分布特征,不同用地类型 *NDVI* 值由大到小依次为:耕地>林地>沼泽地>滩地>草地>盐碱地>沙地。

(2)研究区内大部分地区 *NDVI* 值呈增长趋势,面积为  $5.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占比 92.50%,小部分地区 *NDVI* 值呈减少趋势,面积为  $0.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占比 7.50%。

(3)研究区 *NDVI* 值与降水量、气温、土壤湿度关系密切,呈正相关关系,相关系数分别为 0.86, 0.78, 0.81。降水对植被生长影响最大。

(4)地下水埋深为 0~4 m 时,*NDVI* 值随埋深的增加而增大;地下水埋深 4~10 m 时,*NDVI* 值趋于稳定,在 0.4 上下浮动;地下水埋深大于 10 m 时,*NDVI* 值随埋深的增加而急剧减小。*NDVI* 值在地下水埋深为 3 m 左右达到最大值 0.43。

(5)人类活动如土地开垦、植树造林是近 20 年来 *NDVI* 值呈增加趋势的主要原因之一,在一定程度上改善了当地生态环境。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] FOLEY J A, LEVIS S, COSTA M H, et al. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(6): 1620 – 1632.
- [ 2 ] JIN X M, GUO R H, ZHANG Q, et al. Response of vegetation pattern to different landform and water-table depth in Hailiutu River basin, Northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(11): 4889 – 4898.
- [ 3 ] PAN N Q, FENG X M, FU B J, et al. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 214: 59 – 72.
- [ 4 ] BETTS R A. Global vegetation and climate: Self-beneficial effects, climate forcings and climate feedbacks[J]. *Journal De Physique IV (Proceedings)*, 2004, 121: 37 – 60.
- [ 5 ] ZHU L K, SOUTHWORTH J. Disentangling the relationships between net primary production and precipitation in southern Africa savannas using satellite observations from 1982 to 2010[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 3803 – 3825.
- [ 6 ] 刘维,宋迎波. 2019年秋收作物生长季农业气象条件评价[J]. *中国农业气象*, 2020, 41(3): 187 – 190. [ LIU Wei, SONG Yingbo. Evaluation of agrometeorological conditions in the growing season of autumn crops in 2019[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(3): 187 – 190. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 周爱国,马瑞,张晨. 中国西北内陆盆地水分垂直循环及其生态学意义[J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 127 – 133. [ ZHOU Aiguo, MA Rui, ZHANG Chen. Vertical water cycle and its ecological effect in inland basins, Northwest China[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(1): 127 – 133. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] FABRICANTE I, OESTERHELD M, PARUELO J M. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(8): 745 – 753.
- [ 9 ] KHAN I A A, ARSALAN M H B, SIDDIQUI M F C, et al. Short-term drought assessment in Pakistan and adjoining areas by remote sensing MODIS-NDVI data: A potential consequence of climate change(Article)[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2016, 48(5): 1887 – 1892.
- [ 10 ] 杨泽元,王文科,黄金廷,等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水埋深研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(8): 67 – 74. [ YANG Zeyuan, WANG Wenke, HUANG Jinting, et al. Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2006, 34(8): 67 – 74. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 张二勇,陶正平,王晓勇,等. 基于植被结构分析法的生态植被与地下水关系研究——以鄂尔多斯盆地内蒙古能源基地为例[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 811 – 817. [ ZHANG Eryong, TAO Zhengping, WANG Xiaoyong, et al. A study of vegetation response to groundwater on regional scale in northern Ordos Basin based on structure chart method[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 811 – 817. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 金晓媚,王松涛,夏薇. 柴达木盆地植被对气候与地下水变化的响应研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 31 – 36. [ JIN Xiaomei, WANG Songtao, XIA Wei. Response of vegetation to variation in climate and groundwater in the Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 31 – 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 金晓媚,张强,杨春杰. 海流兔河流域植被分布与地形



- 地貌及地下水位关系研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 227 - 233. [JIN Xiaomei, ZHANG Qiang, YANG Chunjie. Research on vegetation distribution and its relationship with topography and groundwater depth in the Hailiutu River Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 227 - 233. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 王旭升, 万力, 齐蕊, 等. 鄂尔多斯高原地下水与植被盖度的相互影响[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5): 1013 - 1022. [WANG Xusheng, WAN Li, QI Rui, et al. Interactions between groundwater and vegetation coverage in Erdos plateau[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(5): 1013 - 1022. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 赵捷, 徐宗学, 牛最荣, 等. 黑河上中游流域植被时空演变规律及其对水热条件的响应特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 387 - 392. [ZHAO Jie, XU Zongxue, NIU Zuirong, et al. Spatiotemporal variation of vegetation in response to changes in temperature and precipitation in upper and middle reaches of the Heihe River basin: a SPOT NDVI dataset study[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(3): 387 - 392. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 李元春, 葛静, 侯蒙京, 等. 基于CCI-LC数据的甘南和川西北地区土地覆盖类型时空动态分布及草地面积变化驱动力研究[J]. 草业学报, 2020, 29(3): 1 - 15. [LI Yuanchun, GE Jing, HOU Mengjing, et al. A study of the spatiotemporal dynamic of land cover types and the driving forces of grassland area change in Gannan Prefecture and Northwest Sichuan based on CCI-LC data[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(3): 1 - 15. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] SPRUCE J P, SADER S, RYAN R E, et al. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by Gypsy moth outbreaks[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 427 - 437.
- [18] JIN X M, LIU J T, WANG S T, et al. Vegetation dynamics and their response to groundwater and climate variables in Qaidam Basin, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(3): 710 - 728.
- [19] RHIF M, BEN ABBES A, MARTINEZ B, et al. An improved trend vegetation analysis for non-stationary NDVI time series based on wavelet transform[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(34): 46603 - 46613.
- [20] BIANCHI E, VILLALBA R, SOLARTE A. NDVI spatio-temporal patterns and climatic controls over northern Patagonia[J]. Ecosystems, 2020, 23(1): 84 - 97.
- [21] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794 - 805. [DING Yihui, ZHANG Li. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 794 - 805. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 刘蓉, 文军, 王欣. 黄河源区蒸散发量时空变化趋势及突变分析[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(5): 503 - 511. [LIU Rong, WEN Jun, WANG Xin. Spatial-temporal variation and abrupt analysis of evapotranspiration over the Yellow River source region[J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(5): 503 - 511. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467 - 477. [GAO Yanchun, WANG Jinfeng, FENG Zhiming. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 467 - 477. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] DENG Y H, WANG S J, BAI X Y, et al. Variation trend of global soil moisture and its cause analysis[J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105939.

编辑: 张若琳