

## 黄河流域植被时空变化及其与土壤湿度的相关性分析

高萌萌, 李小磊, 杨楠, 王轶, 刘琼, 赵子鑫

### Spatio-temporal variation of vegetation and its correlation with soil moisture in the Yellow River Basin

GAO Mengmeng, LI Xiaolei, YANG Nan, WANG Yi, LIU Qiong, and ZHAO Zixin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108051>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

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

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175-182

#### 基于地质建造探索承德市土地利用优化路径

Exploration of land use optimization path based on geological formation in Chengde City

卫晓锋, 王京彬, 孙厚云, 殷志强, 何泽新, 贾凤超, 李霞, 刘宏伟, 张竞 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 15-25

#### 毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 34-42

#### 基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52

#### 玛纳斯河流域山前平原区蒸散发时空异质性分析

Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin

席丹, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 张在勇 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 25-34

#### 黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta

张晨晨, 黄, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108051

高萌萌, 李小磊, 杨楠, 等. 黄河流域植被时空变化及其与土壤湿度的相关性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 172-181.  
GAO Mengmeng, LI Xiaolei, YANG Nan, *et al.* Spatio-temporal variation of vegetation and its correlation with soil moisture in the Yellow River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 172-181.

## 黄河流域植被时空变化及其与土壤湿度的相关性分析

高萌萌, 李小磊, 杨楠, 王轶, 刘琼, 赵子鑫  
(中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:** 黄河流域连接了青藏高原、黄土高原、内蒙古高原、华北平原, 是我国重要的生态屏障。开展黄河流域植被时空变化及其与土壤湿度相关性分析, 定量揭示土壤湿度对植被生长的影响, 有利于干旱监测及生态环境保护。利用 MOD13Q1 NDVI 产品和全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)土壤湿度数据, 采用 Sen+Mann-Kendall 趋势检验法和相关性分析法, 分析了 2000—2020 年黄河流域植被时空变化特征及土地利用变化对植被生长的影响, 并在流域尺度探索了生长季植被归一化植被指数(NDVI)与不同深度土壤湿度的相关性。结果表明: (1) 研究区植被 NDVI 在空间上呈现“南高北低”的特征, 沿黄河径流方向, 上游右岸区域植被生长状况明显好于左岸, 中下游两岸区域植被生长状况无明显差异。2000—2020 年 NDVI 整体呈增加趋势, 从 2000 年的 0.356 增加到 2020 年的 0.435。(2) 不同用地类型的 NDVI 由大到小依次为: 林地>耕地>草地>未利用地, 不同季节 NDVI 由大到小依次为: 夏季>秋季>春季>冬季。(3) 研究区大部分区域植被生长状况处于改善和稳定的状态, 小部分区域处于退化状态, 退化区域的主要原因是草地退化、城市扩张导致耕地退化及耕地转为建设用地。(4) NDVI 与不同深度的土壤湿度(0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm、100~200 cm)整体呈正相关趋势, 相关系数分别为 0.535, 0.647, 0.681, 0.619; 不同土地利用类型的 NDVI 与不同深度土壤湿度的相关性有差异, 耕地、草地和未利用地 NDVI 与 10~40 cm 处的土壤湿度正相关面积最大, 而林地 NDVI 与 40~100 cm 处的土壤湿度正相关面积最大。相关研究成果可为黄河流域高质量发展提供科学依据。

**关键词:** NDVI; 土壤湿度; 变化趋势; 土地利用; 黄河流域

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0172-10

## Spatio-temporal variation of vegetation and its correlation with soil moisture in the Yellow River Basin

GAO Mengmeng, LI Xiaolei, YANG Nan, WANG Yi, LIU Qiong, ZHAO Zixin  
(China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Analyzing the temporal and spatial changes of vegetation and its correlation with soil moisture and quantitatively revealing the impact of soil moisture on vegetation growth are of certain significance for drought monitoring and ecological protection. However, previous quantitative researches on soil moisture and vegetation growth are not enough. Based on MOD13Q1 NDVI products and global land data assimilation system (GLDAS) soil moisture data, Sen + Mann Kendall trend test and correlation analysis are used to analyze the temporal and

收稿日期: 2021-08-24; 修订日期: 2021-11-04

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

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190506; DD20221726); 国家自然科学基金项目(41702386)

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: [gaomm@mail.cgs.gov.cn](mailto:gaomm@mail.cgs.gov.cn)

通讯作者: 李小磊(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境地质、国土空间规划研究工作。E-mail: [lixiaolei@mail.cgs.gov.cn](mailto:lixiaolei@mail.cgs.gov.cn)

spatial variation characteristics of vegetation and the impact of land use change on vegetation growth in the Yellow River Basin from 2000 to 2020. The correlation between vegetation and soil moisture at different depths in growing season is explored. The results show that (1) the vegetation growth is characterized by “high in the south and low in the north”. Along the runoff direction of the Yellow River, the vegetation growth on the right bank of the upper reaches is significantly better than that on the left bank, and there is no significant difference in the vegetation growth on the two banks of the middle and lower reaches. The *NDVI* increases by 22.19% from 2000 to 2020, with the highest value of 0.435 and the lowest value of 0.356. (2) The order of *NDVI* value of different land use types from large to small is woodland>cultivated land>grassland>unused land. The order of *NDVI* value of different seasons from large to small is summer>autumn>spring>winter. (3) Most of the vegetation is in the state of improvement and stability, and a small part is in the state of degradation. The main reason for the degradation is grassland degradation, and urban expansion leads to the degradation of cultivated land and the conversion of cultivated land to construction land. (4) *NDVI* is positively correlated with soil moisture at different depths (0–10 cm, 10–40 cm, 40–100 cm, 100–200 cm), with the correlation coefficients of 0.535, 0.647, 0.681 and 0.619, respectively. The correlation between *NDVI* of different land use types and soil moisture of different depths is different. The positive correlation area between *NDVI* and soil moisture of cultivated land, grassland and unused land is the largest at the depth of 10–40 cm, while the positive correlation area between *NDVI* and soil moisture of forest land is the largest at the depth of 40–100 cm.

**Keywords:** *NDVI*; soil moisture; trend; land use; Yellow River Basin

植被作为陆地生态系统的组成部分,是连接大气、水体、土壤的重要纽带,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>[1-2]</sup>,具有水土涵养、改善土壤、调节气候等生态功能<sup>[3-4]</sup>。土壤水是联系地表水、地下水和大气水的纽带<sup>[5-6]</sup>,大气降水入渗及地表水、地下水的相互转化都离不开土壤水。土壤水是调节气候—土壤—植被系统动态变化和控制植被时空格局的关键变量<sup>[7-8]</sup>。土壤湿度是表征土壤含水率的一种相对变量,对作物生长具有决定性作用<sup>[9]</sup>,同时植被的水源涵养功能会对土壤湿度有反馈作用。

基于时间序列分析区域植被生长变化趋势及其影响因素是众多学者研究的热点,并且研究发现植被生长与降水、温度、地下水埋深、地形等都有较强的相关性<sup>[10-11]</sup>。近年来,随着国内外对土壤湿度的深入研究,发现土壤湿度与植被生长也有良好的响应关系<sup>[12-14]</sup>,但是研究多集中于表层土壤湿度和植被生长关系。Farrar 等<sup>[15]</sup>研究表明,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, *NDVI*)受同期地表土壤湿度的控制;Wang 等<sup>[16]</sup>研究表明,*NDVI*与植物根系的土壤湿度具有显著的相关性,且在半干旱区,利用 *NDVI* 数据可以很好地估算灌区根系的土壤水分;Zhang 等<sup>[17]</sup>研究发现 *NDVI* 与土壤含水量有很强的相关性,并指出植被最适宜生长的土壤含水率为 25%~33%;张翀等<sup>[18]</sup>在研究黄土高原植被生长和土

壤湿度变化时发现,二者变化密切相关,且植被生长对土壤湿度变化存在明显的时滞效应;翟雅倩等<sup>[19]</sup>研究发现秦巴山区植被覆盖与土壤湿度时空变化呈明显的正相关性。

国内学者对黄河流域的植被状况进行了详细的研究,多是分析 *NDVI* 与气象因子(降水、温度等)的关系<sup>[20-23]</sup>,忽略了土壤水分也是影响是被生长的重要因素。本文在以往研究的基础上,分析黄河流域 2000—2020 年植被 *NDVI* 时空变化趋势及土地利用变化对植被生长的影响,并在流域尺度探索了生长季植被 *NDVI* 与不同深度土壤湿度的相关性,定量揭示土壤湿度对植被生长的影响,对于干旱监测及生态保护具有一定意义,可为黄河流域高质量发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

黄河发源于青藏高原,全长约 5 464 km,流经青海、四川、宁夏、甘肃、陕西、内蒙、山西、河南、山东等 9 个省(区)。黄河流域的范围没有统一定论,本文将黄河及其支流所流经的 70 个地级市作为研究区范围,面积约 215 万 km<sup>2</sup>。研究区在北纬 27°~44°和东经 89°~120°之间,地势西高东低,多为干旱半干旱区,包含黄土高原水土流失区、五大沙漠沙地,连接了青藏高原、黄土高原、内蒙古高原和华北平原等地区(图 1)。



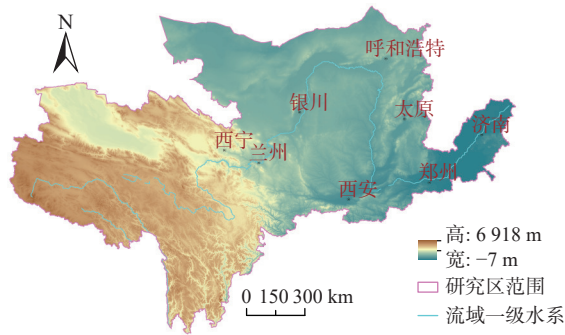


图 1 研究区地理位置和高程图

Fig. 1 Geographic location and elevation map of the study area

## 2 研究数据及方法

### 2.1 数据及处理

#### (1) NDVI

NDVI 是植被空间分布和植物生长状态的指示因子,与地表植被覆盖率呈正比,是目前国内外最常见的表达植被生长状况和覆盖情况的指标<sup>[24-26]</sup>。NDVI 越大,说明植被生长状况越好,NDVI 越小,说明植被生长状况越差<sup>[27]</sup>。本文采用的 NDVI 来源于 MOD13Q1 遥感数据,可在美国 NASA 网(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)免费获取。该遥感数据空间分辨率 250 m,时间分辨率 16 d。本文所选用的 2000—2020 年生长季 6—9 月 MOD13Q1 遥感数据共计 168 期。

#### (2) 土壤湿度数据

传统的土壤湿度监测方法包括中子仪法、重量法、电阻法、快速烘干法等,能有效监测土壤湿度,但是采样速度慢,难以获取大范围实时精确的监测。因此,长时间序列和区域尺度的土壤湿度数据可以依靠全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)获取,虽然该系统提供的数据精度不及实测数据,但是获取方便,不受时间和空间的限制,且相较于其他模拟产品,GLDAS 数据模拟结果更加合理<sup>[28]</sup>,可以较好地模拟我国土壤湿度空间分布特征<sup>[29]</sup>,能够满足大流域范围的土壤湿度分布特征分析。GLDAS NOAH 模型数据集是美国 NASA 提供的全球尺度陆面同化数据集,包含 0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm 和 100~200 cm 的土壤湿度数据,单位为 kg/m<sup>2</sup>。空间分辨率是 0.25°×0.25°,时间分辨率是 1 个月。本文所选用的 2000—2020 年生长季 6—9 月土壤湿度数据共计 84 期。

#### (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,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 8 类,分别是耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地(图 2)。本文选用 2000 年和 2020 年的土地利用数据。

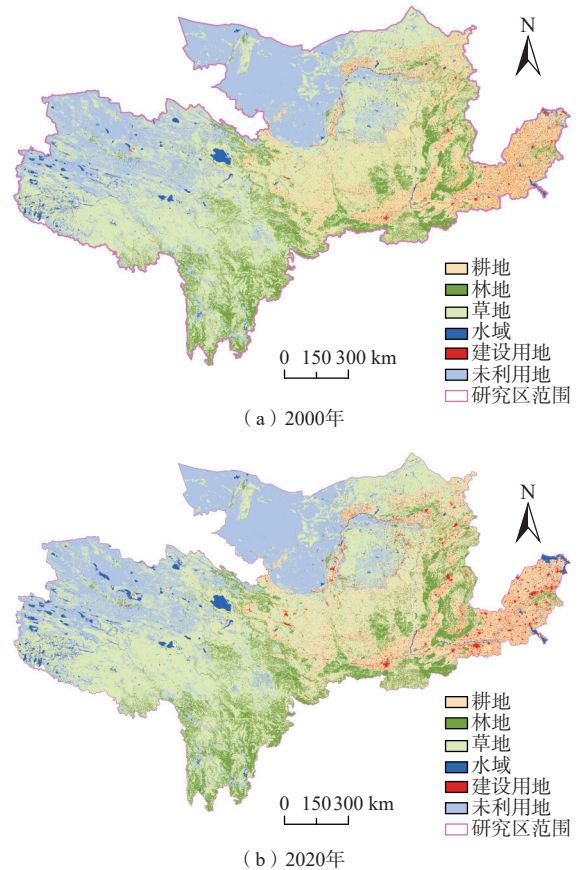


图 2 研究区 2000 年和 2020 年土地利用分布图

Fig. 2 Distribution maps of land use in 2000 and 2020

### 2.2 研究方法

#### (1) 最大化处理

MOD13Q1 数据时间分辨率是 16 d,平均每月有 2 期数据。为了消除云、大气及太阳高度角的影响,采用最大值合成法(maximum value composites, MVC)对每月 2 期的 NDVI 数据进行最大化处理,求取当月各栅格数据的最大值。

#### (2) Sen+Mann-Kendall 趋势检验法

Sen+Mann-Kendall 趋势检验法结合了 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验。该方法具有较好的抗噪性,对数据连续性没有严格要求,不受数据分布形态的影响,能有效避免异常值的干扰。目前,该方法被广泛应用于植被长时间序列分析中<sup>[25-27]</sup>。

本文用 Theil-Sen 法计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (1)$$

式中:  $\beta$ ——NDVI 变化趋势。若  $\beta > 0$  表示 NDVI 呈增长趋势, 反之则呈下降趋势。本文研究中, 将  $\beta \geq 0.001$  区域划分为改善区,  $\beta \leq -0.001$  区域划分为退化区,  $-0.001 < \beta < 0.001$  区域划分为稳定区;

$i, j$ ——时间序数;

$NDVI_i, NDVI_j$ ——第  $i, j$  年的 NDVI 值;

$\text{Median}$ ——中值函数。

采用 Mann-Kendall 方法度量研究区 NDVI 的变化趋势的显著性, 其趋势检验法过程如下:

原假设  $H_0$  为时间序列数据  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 是  $n$  个独立的、随机变量同分布的样本, 即无显著趋势; 假设  $H_1$  是双边检验序列, 存在上升或下降单调趋势, 对于所有的  $i, j \leq n$  且  $i < j$ 。

定义统计量  $S$ :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(NDVI_i - NDVI_j) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(NDVI_i - NDVI_j) = \begin{cases} 1, & NDVI_i - NDVI_j > 0 \\ 0, & NDVI_i - NDVI_j = 0 \\ -1, & NDVI_i - NDVI_j < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $S$ ——NDVI 时序数据统计量;

$n$ ——样本数;

$\text{sgn}$ ——符号函数。

当  $n \geq 10$  时, 统计量  $S$  近似服从标准正态分布, 使用检验统计量  $Z$  进行趋势检验,  $Z$  值由式(4)计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Z$ ——显著性统计量;

$\text{Var}(S)$ ——方差函数,  $\sqrt{\text{Var}(S)} = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

在双边趋势检验中, 对于给定的置信水平  $(\alpha)$ , 若  $|Z| \geq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ , 则原假设  $H_0$  是不可接受的, 即在  $\alpha$  上, 时间序列数据存在明显的上升或者下降趋势。  $Z$  为正值则表示增加趋势, 负值则表示减少趋势。本文  $\alpha$  为 0.05, 即  $|Z| \geq 1.96$  表示通过了显著性检验。

(3) 相关性分析

分析研究区植被 NDVI 与不同深度土壤湿度的相关性, 相关系数计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (6)$$

式中:  $R$ ——因子  $x$  和  $y$  之间的相关系数, 是表示不同因子间的相关性大小的统计指标, 该指标的取值区间为  $[-1, 1]$ 。另外,  $R > 0$  为正相关, 且  $R$  的绝对值越大则表明  $x$  和  $y$  的相关性越密切;

$x_i, y_i$ ——因子样本值;

$\bar{x}, \bar{y}$ ——2 因子样本值的平均值。

### 3 结果

#### 3.1 植被空间分布特征

将 2020 年 6—9 月的 NDVI 求平均值, 得到研究区 2020 年生长季 NDVI 分布图(图 3), 可以看出, 研究区生长季植被 NDVI 分布特征为南高北低。结合 2020 年土地利用类型, 不考虑建设用地和水域, NDVI 值大小依次为: 林地 > 耕地 > 草地 > 未利用地(图 4)。

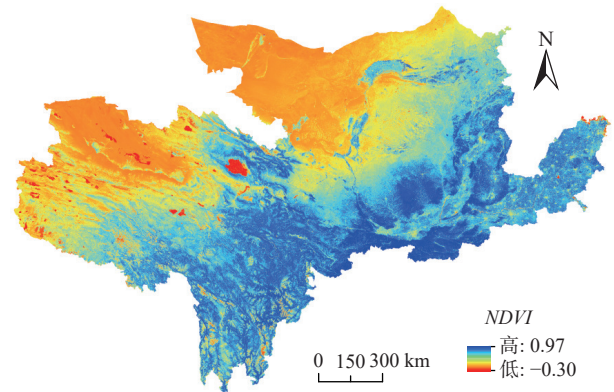


图 3 研究区 2020 年生长季 NDVI 分布图

Fig. 3 Distribution map of NDVI in growth season in 2020

#### 3.2 植被生长状况时间变化特征

将研究区 2000—2020 年每年生长季及 4 个季节的 NDVI 求平均值, 得到 2000—2020 年 NDVI 年际变化和四季变化图(图 5)。由图可看出, 黄河流域在 2000—2020 年间, NDVI 呈增加趋势, 说明植被生长状况整体呈改善趋势。2020 年 NDVI 最高, 为 0.435, 2000 年 NDVI 最低, 为 0.356, 2000—2020 年 NDVI 增加了 22.19%。研究区植被 NDVI 季节特征为: 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。

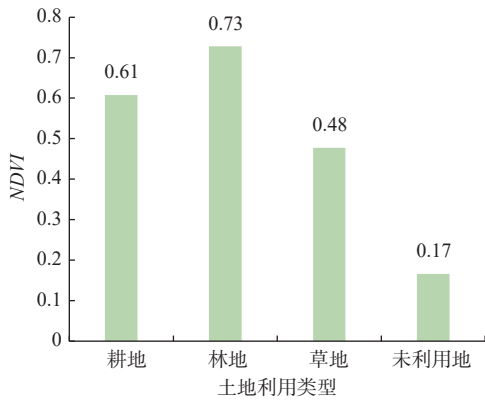


图 4 研究区 2020 年不同土地利用类型 NDVI 统计图

Fig. 4 NDVI statistic histogram of different land use types in 2020

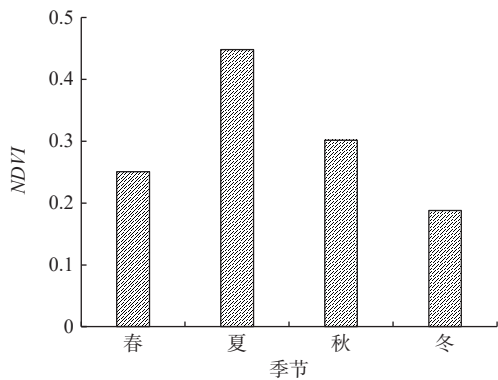
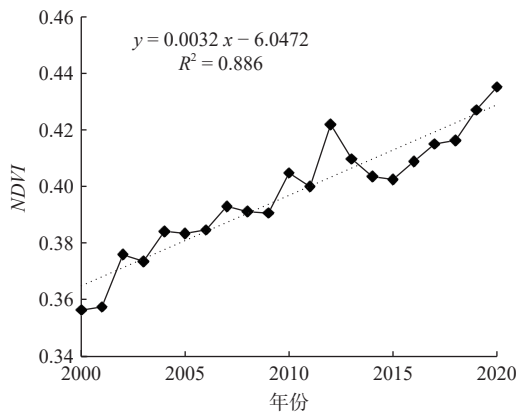


图 5 研究区 2000—2020 年 NDVI 年际变化和四季变化图

Fig. 5 Interannual and seasonal variations of NDVI from 2000 to 2020

### 4 分析与讨论

#### 4.1 植被生长空间变化趋势

用 Sen+Mann-Kendall 趋势检验法对研究区 2000—2020 年的生长季植被 NDVI 变化趋势进行分析, 分类标准如表 1, 将研究区植被生长趋势划分为 5 个等级: 显著改善、轻微改善、基本稳定、轻微退化和显著

退化, 得到 2000—2020 年植被 NDVI 变化趋势分布图 (图 6)。

表 1 Sen+Mann-Kendall 趋势检验法分类标准  
Table 1 Classification standard of Sen + Mann Kendall trend test

指标	$ Z  > 1.96$	$ Z  \leq 1.96$
$\beta > 0.001$	显著改善	轻微改善
$-0.001 \leq \beta \leq 0.001$	基本稳定	基本稳定
$\beta < -0.001$	显著退化	轻微退化

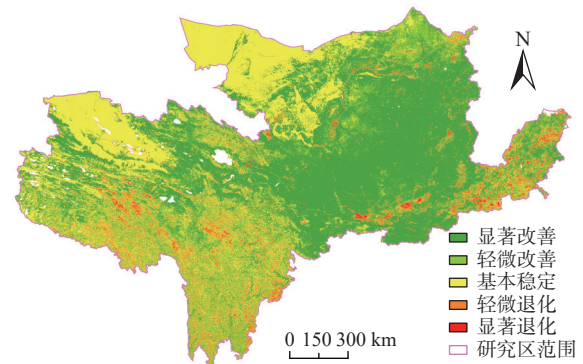


图 6 研究区 2000—2020 年 NDVI 变化趋势图  
Fig. 6 Variation trends of NDVI from 2000 to 2020

由表 2 可以看出, 2000—2020 年, 研究区大部分区域植被生长状况处于改善和稳定的状态, 小部分区域处于退化状态。显著改善和轻微改善的面积占比分别为 47.42% 和 16.74%, 显著退化和轻微退化的面积占比仅为 1.41% 和 5.00%, 基本稳定的区域面积占比为 29.42%。结合 2000—2020 年土地利用类型, 识别研究区植被显著改善和显著退化区域的土地利用转化类型 (图 7), 经分析得到, 显著改善的土地利用类型主要有草地、未利用地和耕地, 其面积为 52.78 万  $\text{km}^2$ , 占全部显著改善区域的 51.77%, 显著退化的土地利用类型主要有草地、耕地、耕地转为建设用地, 其面积为 1.73 万  $\text{km}^2$ , 占全部显著退化区域的 57.10% (图 8)。显著改善的区域主要分 3 部分: 一是阿拉善高原、鄂尔多斯高原及柴达木盆地周边, 分布有巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠、库布其沙漠和毛乌素沙地, 主要用地类型为未利用地, 由于近些年沙地治理及戈壁滩生态修复力度加大, 植被生长状况呈改善趋势; 二是黄土高原及研究区范围内的华北平原, 主要用地类型主要是耕地和草地, 耕地和草地的植被生长状况呈改善趋势; 三是青海高原部分地区, 主要用地类型是草地, 植被生长状况呈改善趋势。显著退化的区域主要有 2 部分, 一是青海高原、川西高原部分地区, 主要用



地类型是草地, 该部分区域草地呈退化趋势; 二是宁夏平原、河套平原、关中盆地、晋中盆地及山东、河南境内中心城区及周边地区, 主要原因是城市扩张导致耕地退化及耕地转为建设用地。

表 2 研究区 2000—2020 年植被生长变化趋势面积统计表  
Table 2 Statistics of the change trend area from 2000 to 2020

序号	变化趋势	面积/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	面积占比/%
1	显著改善	101.95	47.42
2	轻微改善	35.99	16.74
3	基本稳定	63.25	29.42
4	轻微退化	10.75	5.00
5	显著退化	3.03	1.41

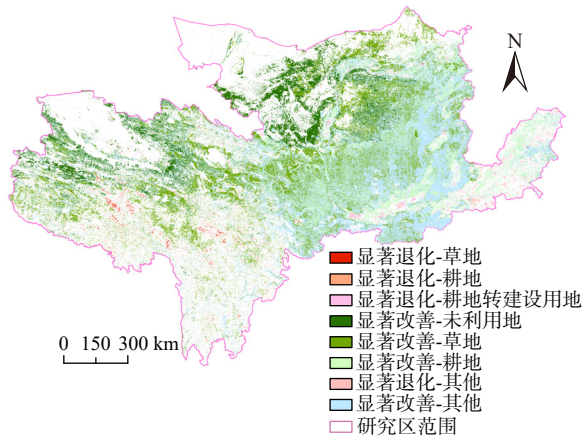


图 7 研究区 2000—2020 年植被显著改善和显著退化区域的土地利用转换类型

Fig. 7 Main land use conversion types in the areas with significant improvement and degradation of vegetation from 2000 to 2020

#### 4.2 植被 NDVI 与土壤湿度的相关性分析

将生长季的 NDVI 与 4 个不同深度(0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm、100~200 cm)的土壤湿度进行相关性分析, 按照 R 的大小分为 6 个等级: 强正相关(0.8 < R ≤ 1)、中正相关(0.3 < R ≤ 0.8)、弱正相关(0 < R ≤ 0.3)、弱负相关(-0.3 ≤ R < 0)、中负相关(-0.8 ≤ R < -0.3)和强负相关(-1 ≤ R < -0.8), 得到研究区 NDVI 和不同深度土壤湿度的相关性分布图(图 9)。

如表 3 所示, 经统计生长季 NDVI 与大部分地区不同深度土壤湿度呈正相关, 小部分地区呈负相关, 正、负相关平均面积占比分别为 76.79% 和 23.22%。其中, NDVI 与 10~40 cm 和 40~100 cm 的土壤湿度正相关面积占比最大, 分别为 82.09% 和 81.07%。随着土壤深度的增加, NDVI 与 100~200 cm 的土壤湿度负相关面积显著增加, 面积占比为 31.52%, 尤其在沙漠戈壁区和灌溉农业区表现最为显著, 主要用地类型为耕

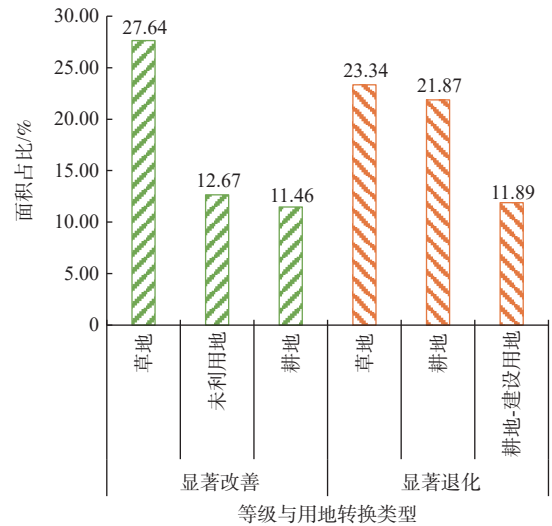


图 8 研究区植被显著改善和显著退化区域的主要用地转换类型

Fig. 8 Main land use conversion types in the areas with significant improvement and degradation of vegetation

地、草地和未利用地。

结合土地利用类型分析植被生长与不同深度土壤湿度相关性, 结果表明: 耕地、草地和未利用地, 随着土壤深度的增加, 其 NDVI 与土壤湿度正相关面积呈先增加后降低的趋势, 10~40 cm 深度处土壤湿度的正相关面积最大, 之后随着深度继续增加, 二者正相关面积呈减小趋势, 负相关面积呈增加趋势, 且在 100~200 cm 处正相关面积最小。林地随着土壤深度增加, NDVI 与土壤湿度正相关面积呈先增加后降低趋势, 且在 40~100 cm 处正相关面积达到最大, 之后随着土壤深度继续增加, NDVI 与土壤湿度正相关面积减少(图 10)。

将 2000—2020 年生长季 NDVI 与土壤湿度区域上的平均值进行线性相关性分析可知: NDVI 与 0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm、100~200 cm 的土壤湿度整体呈正相关趋势, R 分别为 0.535, 0.647, 0.681 和 0.619, 均通过了显著性检验(P < 0.01)。NDVI 与 0~10 cm 土壤湿度相关性最弱, 与 40~100 cm 土壤湿度相关性最强(图 11)。

0~10 cm 的表层土壤, 受土壤质地、降水、灌溉、蒸发等外界因素扰动较大, 土壤湿度与 NDVI 的相关性较小; 10~100 cm 的土壤, 受上述外界因素扰动较小, 随着土壤深度的增加, 二者相关性呈增加趋势; 当土壤深度达到 100~200 cm 时, 受植物根系等因素的影响, 土壤湿度对植被的控制作用逐渐变小, 二者相关性转而变小。

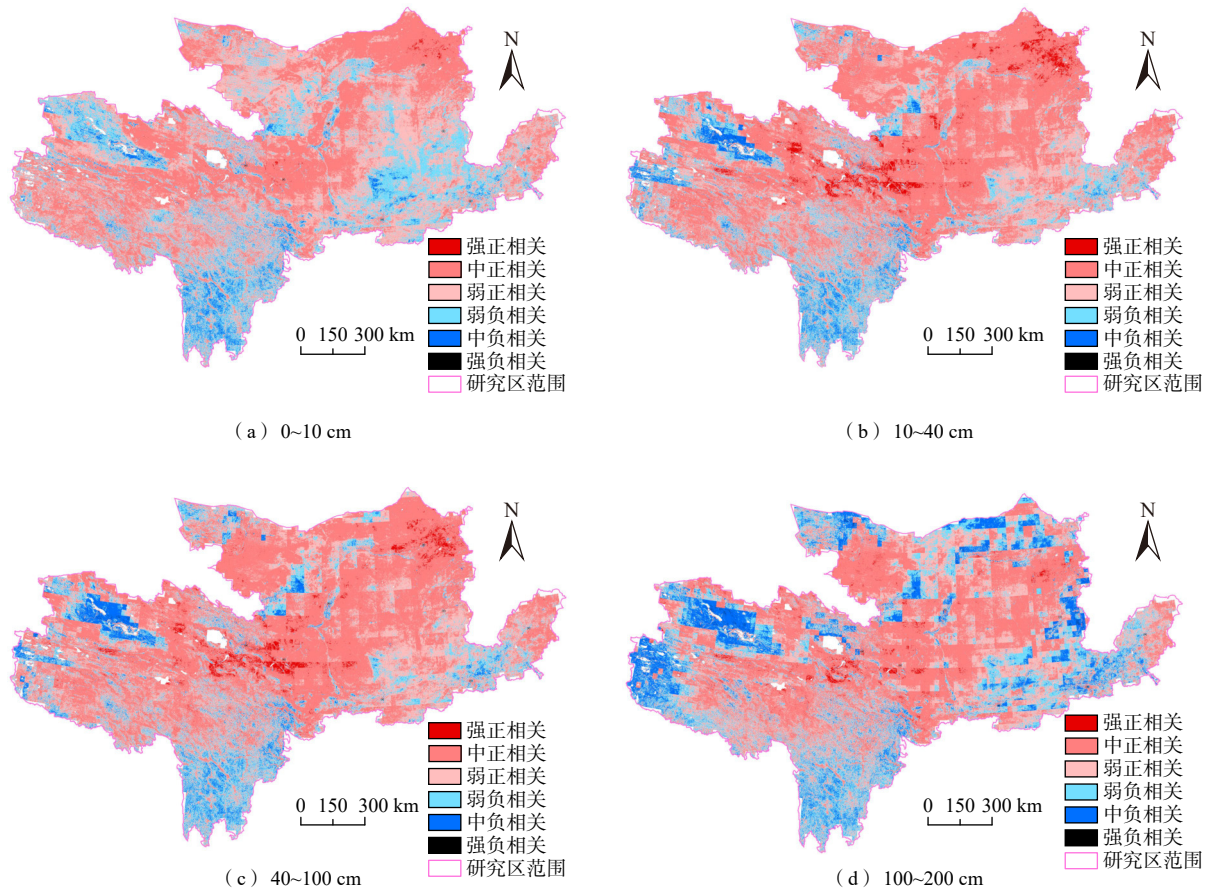


图 9 研究区生长季 *NDVI* 与不同深度土壤湿度的相关性空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution of correlation between *NDVI* and soil moisture at different depths during growing season

表 3 研究区 *NDVI* 与不同深度土壤湿度相关性面积统计表

Table 3 Statistics of the correlation area between *NDVI* and soil moisture at different depths

相关性	面积占比/%				
	0 ~ 10 cm	10 ~ 40 cm	40 ~ 100 cm	100 ~ 200 cm	平均
强负相关	0.00	0.04	0.07	0.26	0.09
中负相关	3.63	4.04	4.78	10.87	5.83
弱负相关	20.89	13.81	14.09	20.39	17.30
弱正相关	38.77	28.34	27.89	29.20	31.05
中正相关	36.59	51.70	51.46	38.58	44.58
强正相关	0.13	2.05	1.72	0.71	1.15
负相关之和	24.52	17.89	18.94	31.52	23.22
正相关之和	75.49	82.09	81.00	68.49	76.79

### 5 结论

(1)研究区植被 *NDVI* 呈现“南高北低”的空间分布特征, 2000—2020 年 *NDVI* 整体呈增加趋势, 不同用地类型的 *NDVI* 值由大到小依次为: 林地>耕地>草地>未利用地, 不同季节 *NDVI* 值由大到小依次为: 夏季>秋季>春季>冬季。

(2)2000—2020 年研究区植被显著改善和轻微改善的面积占比分别为 47.42% 和 16.74%, 显著退化和轻微退化的面积占比仅为 1.41% 和 5.00%, 基本稳定的区域面积占比 29.42%。显著改善的土地利用类型主要有草地、未利用地和耕地, 占全部显著改善区域的 51.77%, 显著退化的土地利用类型主要有草地、耕地、耕地转为建设用地, 占全部显著退化区域的 57.10%。

(3)*NDVI* 与 0 ~ 10 cm、10 ~ 40 cm、40 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm 的土壤湿度整体呈正相关趋势, *R* 分别为 0.535, 0.647, 0.681, 0.619。从空间上看, *NDVI* 与 10 ~ 40 cm 和 40 ~ 100 cm 的土壤湿度正相关面积占比最大, 分别为 82.09% 和 81.07%。随着土壤深度的增加, *NDVI* 与 100 ~ 200 cm 的土壤湿度负相关性面积显著增加, 面积占比为 31.52%。

(4)从土地利用角度分析, 耕地、草地和未利用地的, 随着土壤深度的增加, 其 *NDVI* 与土壤湿度正相关面积呈先增加后降低的趋势, 与 10 ~ 40 cm 深度处土



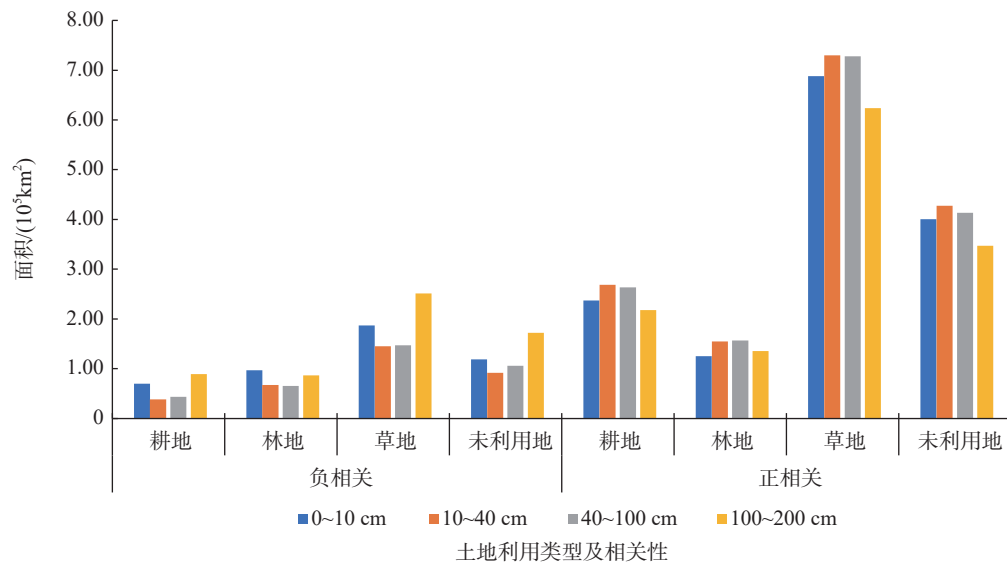


图 10 研究区不同土地利用类型 NDVI 与土壤湿度相关性面积统计图

Fig. 10 Area histogram of correlation between NDVI and soil moisture in different land use types

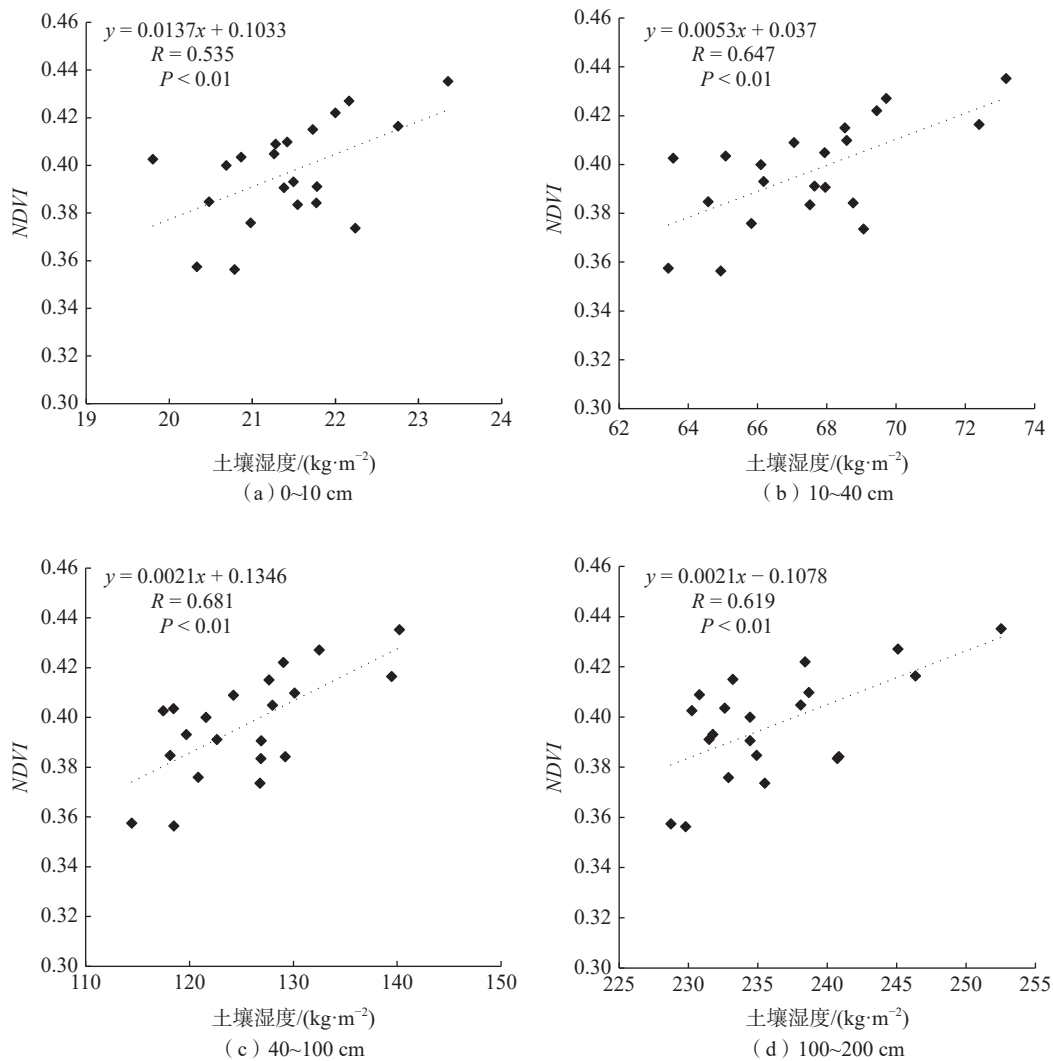


图 11 研究区生长季 NDVI 与不同深度土壤湿度的相关性拟合图

Fig. 11 Correlation fitting of NDVI and soil moisture at different depths in the growth season

壤湿度的正相关面积最大;林地随着土壤深度增加, *NDVI* 与土壤湿度正相关面积呈先增加后降低趋势,且在 40~100 cm 处正相关面积达到最大。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] DUVEILLER G, HOOKER J, CESCATTI A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1 - 12.
- [ 4 ] 刘明霞, 刘友存, 陈明, 等. 2000—2018年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 284 - 290. [ LIU Mingxia, LIU Youcun, CHEN Ming, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation coverage and its response to climate change in upper reaches of Ganjiang River Basin during 2000—2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 284 - 290. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] BROCCA L, MELONE F, MORAMARCO T, et al. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy[J]. *Geoderma*, 2009, 148(3/4): 364 - 374.
- [ 6 ] WANG Tiejun, SINGH S K, BÁRDOSSY A. On the use of the critical event concept for quantifying soil moisture dynamics[J]. *Geoderma*, 2019, 335: 27 - 34.
- [ 7 ] PORPORATO A, RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: A challenging multidisciplinary research perspective[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(5): 811 - 822.
- [ 8 ] 王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 等. 近40年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 1 - 20. [ WANG Yao, CHEN Ruishan, GUO Chihui, et al. Changes of resource and environmental pattern of the Yellow River Basin in the past 40 years and suggestions on geological work[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 1 - 20. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 张京, 金晓媚, 张绪财, 等. 格尔木河流域土壤湿度时空变化及其影响因素研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 66 - 73. [ ZHANG Jing, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and its impact factors in the Golmud River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 66 - 73. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 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) ]
- [ 11 ] PIEDALLU C, CHÉRET V, DENUX J P, et al. Soil and climate differently impact *NDVI* patterns according to the season and the stand type[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2874 - 2885.
- [ 12 ] HONG W Y, PARK M J, PARK J Y, et al. The spatial and temporal correlation analysis between MODIS *NDVI* and SWAT predicted soil moisture during forest *NDVI* increasing and decreasing periods[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2010, 14(6): 931 - 939.
- [ 13 ] AHMED M, ELSE B, EKLUNDH L, et al. Dynamic response of *NDVI* to soil moisture variations during different hydrological regimes in the Sahel region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(19): 5408 - 5429.
- [ 14 ] 刘庚, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 黄土丘陵区不同植被土壤水分的分异性特征[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 83 - 88. [ LIU Geng, NIU Junjie, ZHU Weixin, et al. Heterogeneous characteristics of soil moisture of different vegetation types in loess hilly regions[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6): 83 - 88. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] FARRAR T J, NICHOLSON S E, LARE A R. The influence of soil type on the relationships between *NDVI*, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. *NDVI* response to soil moisture[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50(2): 121 - 133.
- [ 16 ] WANG Xianwei, XIE Hongjie, GUAN Huade, et al. Different responses of MODIS-derived *NDVI* to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1/2): 12 - 24.
- [ 17 ] ZHANG Hongxue, CHANG Jianxia, ZHANG Lianpeng, et al. *NDVI* dynamic changes and their relationship with meteorological factors and soil moisture[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(16): 582.

- [18] 张翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2128 - 2138. [ZHANG Chong, LEI Tianwang, SONG Dianxing. Analysis of temporal and spatial characteristics of time lag correlation between the vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2128 - 2138. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 翟雅倩, 张翀, 周旗, 等. 秦巴山区植被覆盖与土壤湿度时空变化特征及其相互关系[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(7): 967 - 977. [ZHAI Yaqian, ZHANG Chong, ZHOU Qi, et al. Spatio-temporal variation and interrelationship of vegetation cover and soil moisture in Qinling-Daba Mountains[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(7): 967 - 977. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜, 等. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 1 - 7. [GUO Shuai, PEI Yanqian, HU Sheng, et al. Response of vegetation index to climate change and their relationship with runoff-sediment change in Yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 谷佳贺, 薛华柱, 董国涛, 等. 黄河流域NDVI/土地利用对蒸散发时空变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 158 - 167. [GU Jiahe, XUE Huazhu, DONG Guotao, et al. Effects of NDVI/land-use on spatiotemporal changes of evapotranspiration in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 158 - 167. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 颜明, 贺莉, 王随继, 等. 基于NDVI的1982—2012年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3): 86 - 94. [YAN Ming, HE Li, WANG Suiji, et al. Changing trends of NDVI in the Yellow River Basin from 1982 to 2012 at different temporal scales[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(3): 86 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被NDVI与温度、降水关系的时空变化[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 477 - 481. [LIU Lvliu, XIAO Fengjin. Spatial-temporal correlations of NDVI with precipitation and temperature in Yellow River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(5): 477 - 481. (in Chinese with English abstract)]
- [24] JIN Xiaomei, LIU Jintao, WANG Songtao, 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.
- [25] BIANCHI E, VILLALBA R, SOLARTE A. NDVI spatio-temporal patterns and climatic controls over northern Patagonia[J]. Ecosystems, 2020, 23(1): 84 - 97.
- [26] 贺军亮, 韦锐, 李丽, 等. 基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 91 - 98. [HE Junliang, WEI Rui, LI Li, et al. Temporal and spatial evolution of vegetation cover in Chengde based on time series NDVI data[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 91 - 98. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王家录, 李维杰, 王勇, 等. 2005—2014年重庆石漠化地区NDVI的时空变化及其与气候因子相关性分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 217 - 223. [WANG Jialu, LI Weijie, WANG Yong, et al. Spatial-temporal variation of NDVI and its responses to hydrothermal condition in rocky desertification area of Chongqing City from 2005 to 2014[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 217 - 223. (in Chinese with English abstract)]
- [28] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381 - 394.
- [29] 沈润平, 张悦, 师春香, 等. 长时间序列多源土壤湿度产品在中国地区的比较分析[J]. 气象科技, 2016, 44(6): 867 - 874. [SHEN Runping, ZHANG Yue, SHI Chunxiang, et al. Inter-comparison of various long-time soil moisture datasets in China[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(6): 867 - 874. (in Chinese with English abstract)]