

德州市生态环境质量指标时空变化特征

尹 婧, 于富华, 陈现恒, 周鸿飞

乐陵市气象局, 山东 德州

收稿日期: 2025年7月10日; 录用日期: 2025年9月17日; 发布日期: 2025年10月13日

摘 要

归一化植被指数是生态质量评价中的一项重要遥感指标, 能够直接反映植被的密度、叶面积指数光合作用强度, 是衡量生态系统初级生产力和植被健康状况的关键参数。本文利用美国航天局提供的MODIS NDVI数据, 通过最大化合成法、逐像元线性回归分析法和皮尔逊相关系数对德州市NDVI动态变化进行分析, 结果表明: (1) 德州市NDVI总体呈波动下降趋势, 2010年减速显著提升, 2015年剧烈波动下降至0.4405, 植被覆盖状况逐步恶化。(2) 年均降水量年际波动剧烈, 年均气温变化总体平稳, 年均温为14.1℃。NDVI与降水量变化趋势大致相同, 与气温变化趋势大致相反。(3) NDVI均值处于0.17~0.60之间, 整体呈现中部高于东西部的特征。德州市大部分地区NDVI变化呈现上升的趋势, 呈现下降趋势的地区主要分布在德城区。植被覆盖度改善、退化的程度并不明显。(4) NDVI与降水的相关性整体略高于气温, NDVI与降水量的相关性变化范围为-0.5874~0.4277, 与气温为-0.7801~0.8275。除降水影响外, 植被生长对农田灌溉具有一定的依赖性。德州市植被覆盖变化受水热条件的共同调控, 但降水因子的贡献更为突出。

关键词

生态质量指标, 归一化植被指数, 线性回归分析, 皮尔逊相关系数

The Spatio-Temporal Variation Characteristics of Eco-Environmental Quality Indicators in Dezhou City

Jing Yin, Fuhua Yu, Xianheng Chen, Hongfei Zhou

Leling Meteorological Bureau, Dezhou Shandong

Received: July 10, 2025; accepted: September 17, 2025; published: October 13, 2025

Abstract

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is a crucial remote sensing indicator in ecological quality assessment. It directly reflects vegetation density, leaf area index, and photosynthetic

文章引用: 尹婧, 于富华, 陈现恒, 周鸿飞. 德州市生态环境质量指标时空变化特征[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(10): 1323-1329. DOI: 10.12677/aep.2025.1510147

intensity, serving as a key parameter for evaluating ecosystem primary productivity and vegetation health status. This study utilizes MODIS NDVI data provided by NASA to analyze the dynamic changes of NDVI in Dezhou City through methods including maximum-value compositing, pixel-wise linear regression analysis, and Pearson correlation coefficient. The results indicate that: (1) The overall trend of the ecological quality indicator NDVI in Dezhou City shows a fluctuating decline. A significant deceleration in the decline rate was observed in 2010, followed by a sharp fluctuating drop to 0.4405 in 2015, indicating a gradual deterioration in vegetation cover conditions. (2) Annual precipitation exhibits substantial interannual variability, while mean annual temperature remains relatively stable, with an average of 14.1°C. The variation trend of NDVI generally aligns with that of precipitation but shows an opposite trend compared to temperature. (3) The mean NDVI values range between 0.17 and 0.60, exhibiting an overall spatial pattern where the central region has higher NDVI values than the eastern and western parts. Most areas in Dezhou City show an increasing trend in NDVI, whereas areas with decreasing trends are mainly concentrated in Decheng District. The degree of improvement or degradation in vegetation coverage is not pronounced. (4) The correlation between NDVI and precipitation is generally slightly higher than that with temperature. The range of correlation coefficients between NDVI and precipitation is -0.5874 to 0.4277 , while that with temperature ranges from -0.7801 to 0.8275 . In addition to precipitation, vegetation growth also relies to some extent on farmland irrigation. Vegetation cover changes in Dezhou City are jointly regulated by hydrothermal conditions, but the contribution of the precipitation factor is more prominent.

Keywords

Eco-Environmental Quality Indicators, Normalized Vegetation Index, Linear Regression Analysis, Pearson's Correlation Coefficient

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在社会经济快速发展的背景下，自然环境持续受到不同程度影响。《2023 年全球气候状况》报告显示，温室气体水平、地表温度、海洋热量和酸化、海平面上升、南极海洋冰盖和冰川退缩等方面的纪录再次被打破。植被作为连接大气、水体、土壤及岩石的纽带，在涵养水源、气候调节和改善生态环境等方面扮演着不可或缺的角色。植被变化在一定程度上可以指示一个地区的生态环境变化，作为研究全球气候变化的指标[1] [2]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)，又称为连续性指数，其原理是植物在红光波段吸收光，在近红外波段反射光，通过测量近红外光和红光之间的差异来量化植被，从而有效区分植被和非植被区域。相对于其他的植被指数，NDVI 能够减少各种其他因素的影响，可以对植被生长过程中的季节变化和年际变化进行有意义的比较，并且能够连续跟随植被的变化状况，广泛应用于分析植被覆盖的时空变化[3]。随着卫星遥感技术的不断进步，针对归一化植被指数(NDVI)时空动态变化及其对气候因子响应特征方面的研究取得了显著的进展，如彭咏石等利用一元线性趋势分析方法研究南昌市 NDVI 变化特征，结果表明 2010~2019 年间 NDVI 变化整体呈现上升趋势[4]；唐吉喆等评估了基于 MODIS 的黄河三角洲湿地 NDVI 和 NPP 相关性的时空变化特征[5]；蔺星娜等研究了清水河上游流域植被指数的时空变化及其驱动因子，并发现 1999~2015 年研究区域植被变化的主要驱动因子为人类活动[6]；石淞等利用地理探测器模型研究 2000~2020 年大兴安岭林草交错带 NDVI 特征，结果表

明 NDVI 时空异质性明显[7]。在全球变暖的背景下,利用植被指数 NDVI 研究德州市生态质量,能够准确分析植被的时空变化特征,对德州市的生态系统管理具有重要意义。

2. 研究区概况

德州市地处山东省西北鲁冀接壤的边境地带,总面积 10356 km²。该市地处黄河下游冲积平原,地势平坦,土地植被类型大多为人工栽植的树木、农作物和野生杂草。水资源相对丰富,海拔高度在 10~30 m 之间,属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,光照充足,年平均气温 13.4℃,年平均降水量 550 mm 左右。

3. 数据和方法

3.1. 数据来源

归一化植被指数(NDVI)数据来源于美国航天航空局(NASA) (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>),选取来自 MODIS-Terra 的 MOD13A3 数据集,时间跨度为 2003~2022 年,时间分辨率为每月,空间分辨率为 1 km,地理坐标系为 WGS_1984。

降水量、气温数据来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>),数据是据 CRU 发布全球 0.5°气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据,通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成。时间跨度为 2003~2022 年,时间分辨率为每月,空间分辨率为 1 km,地理坐标系为 WGS_1984 [8]。

3.2. 研究方法

3.2.1. 最大值合成法

采用 MVC 法处理 NDVI 数据集,获取贵州地区逐月 NDVI 数据,其计算公式如下:

$$Y_{NDVI_i} = \max(INDVI_{ij}) \quad (1)$$

Y_{NDVI_i} 表示第 i 月的月 NDVI 最大合成值, $INDVI_{ij}$ 表示第 j 月的两幅 NDVI 影像。本研究以逐月的 NDVI 数据为基础,采用最大值合成法获取季节 NDVI 值和年 NDVI 值[9]。

3.2.2. 线性回归分析

线性回归分析方法是研究植被动态变化趋势的常用方法,是对一组随时间变化的变量进行回归分析的方法[10],利用一元线性回归方程,对逐像元数据进行时间序列线性拟合。本文以年份为自变量,NDVI 为因变量,模拟 2003~2022 年多年 NDVI 变化趋势,其计算公式如下:

$$y_i = at_i + b \quad (2)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{t} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n (t_i)^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} \quad (4)$$

其中: n 为总年数, x_i 为第 i 年的 NDVI 值, t 表示对应的年份。

3.2.3. 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数 r 用来描述两个变量之间线性相关性的强弱程度[11]。有两组变量分别为 $X = x_1, x_2$,

$x_3, \dots, x_n, Y = y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$, 变量 X 和变量 Y 的皮尔逊相关系数公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)(y_i - \mu_Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_Y)^2}} \quad (5)$$

其中, r 代表皮尔逊相关系数, X, Y 代表变量, μ_X 为变量 X 的平均值, μ_Y 为变量 Y 的平均值, r 的绝对值越大, ndvi 和气象要素之间的相关性越高[12]。

4. 结果与分析

4.1. 时间尺度分析

4.1.1. NDVI 时间变化特征

研究期间, 德州市 NDVI 总体呈现在波动中下降的趋势(图 1), 年均值为 0.47, 2005 年升至最高值 0.5370, 随后到 2015 年剧烈波动下降至 0.4405, 2015~2019 年减速较缓, 基本稳定在 0.4365 ± 0.004 , 年均减率 0.2%, 2022 年下降至最低值 0.3860。这是由于城市化进程不断推进, 建议优化区域生态保护政策及农业管理。

4.1.2. 气候因子时间变化特征

如图 1, 研究期间, 降水量在 160~1338 mm 之间变化, 平均值为 412 mm, 年际波动剧烈, 整体呈现“减少-增加”的周期性变化, 极高值 1337.67 mm 出现在 2020 年, 极低值 160.45 mm 出现在 2014 年。气温变化总体平稳, 年均温为 14.1℃, 最高值 14.8℃ 出现在 2021 年, 最低值 13.4℃ 出现在 2012 年。NDVI 与降水量变化趋势大致相同, 与气温变化趋势大致相反。

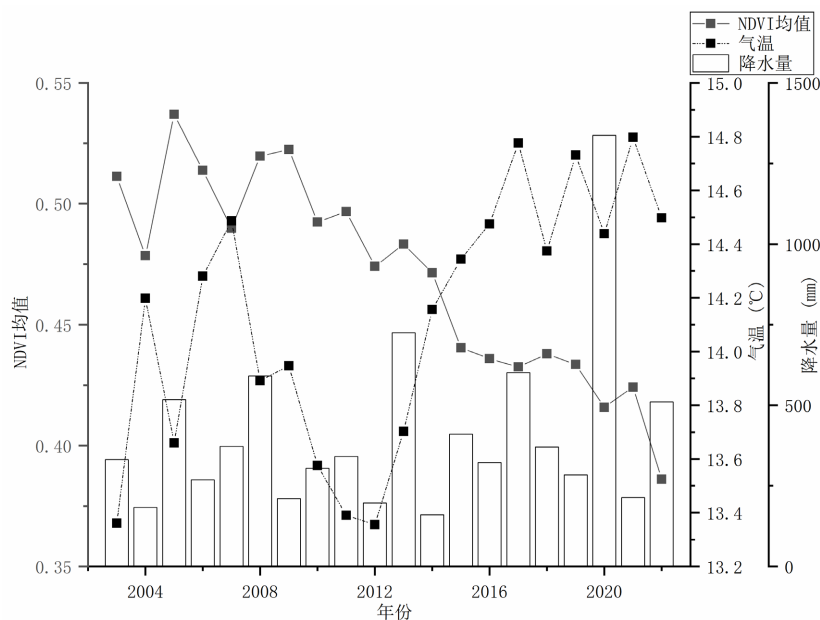


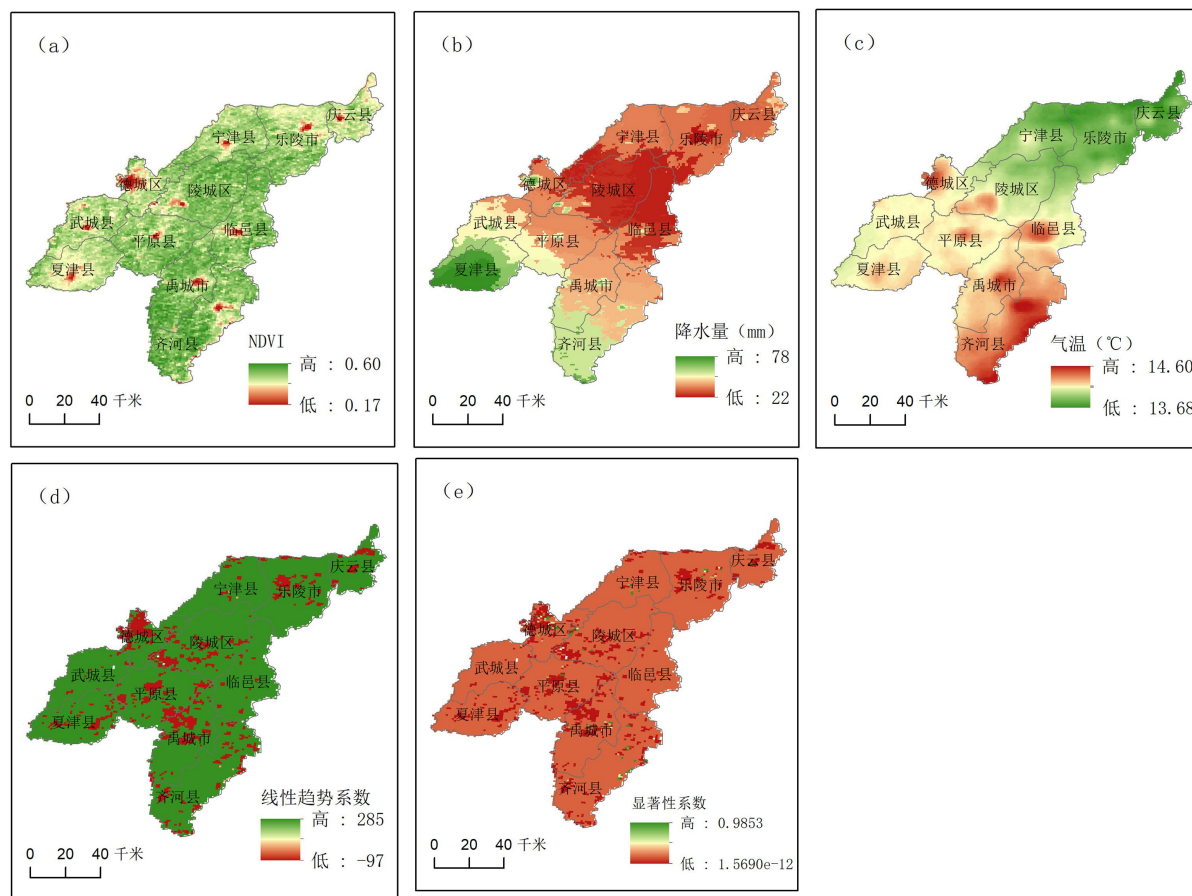
Figure 1. Temporal variation time series of NDVI, temperature, and precipitation

图 1. NDVI、气温、降水量时间变化序列图

4.2. NDVI 与气象要素的时空特征

从多年平均 NDVI 分布图来看(如图 2(a)), NDVI 处于 0.17~0.60 之间, 整体呈现中部高于东西部的特

征。NDVI 高值区主要位于禹城市、齐河县西部以及陵城区东北部, 低值区主要集中在各县市城区位置, 植被覆盖度相较于郊区较低。研究期间, 德州市大部分地区 NDVI 变化整体呈现上升的趋势, 如图 2(d)所示, 呈现下降趋势的地区主要分布在德城区, 这与德城区 2000 年以来城市用地的扩张有密不可分的关系[13]。但结合显著性系数分布图来看(如图 2(e)), 植被覆盖度改善、退化的程度并不明显。从多年平均降水量分布图来看(如图 2(b)), 整体呈现以陵城区为中心向东北和西南方向辐射降低的特征, 且西南向辐射降低的幅度大于东北向。从多年平均气温分布图来看(如图 2(c)), 德州市平均气温在 13.68°C ~ 14.60°C 之间变化, 大致呈现南高北低的空间特征。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 2. Spatial distribution maps of (a) mean NDVI, (b) mean precipitation, (c) mean temperature, (d) NDVI change trend, and (e) significance coefficient

图 2. NDVI 均值(a)、降水量均值(b)、气温均值(c)、NDVI 变化趋势(d)、显著性系数(e)空间分布图

4.3. 相关性分析

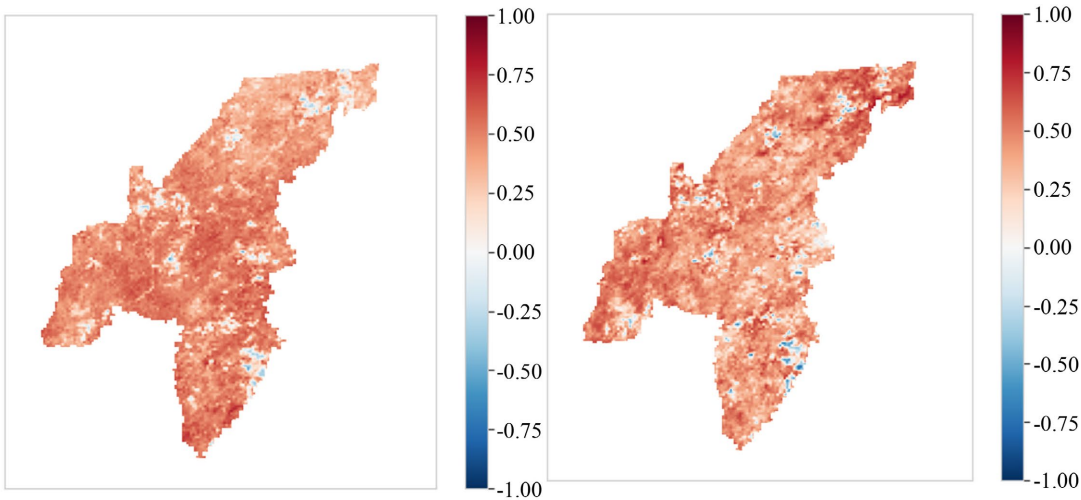
通过对 2003~2022 年德州市各像元的 NDVI 与降水量、气温进行相关性分析(如图 3、表 1), NDVI 与降水量、气温的相关性以正相关为主, 且空间分布格局较为一致。NDVI 与降水量的相关性变化范围为 -0.5874 ~ 0.7623 , 平均值为 0.4277 , 其中呈显著正相关的区域约占 52.56% , 呈显著负相关的区域约占 0.03% 。NDVI 与气温的相关性变化范围为 -0.7801 ~ 0.8275 , 平均值为 0.3964 , 其中呈显著正相关的区域约占 41.26% , 呈显著负相关的区域约占 0.49% 。NDVI 与降水的相关性整体略高于气温, 这是由于温度过高影

响土壤微生物活性,从而使酶活性降低,并不适宜植被的生长[14][15]。而植被生长的水分来源不单来自降水,更依赖于农业灌溉,有研究指出,在北方干旱时期,灌溉在一定程度上缓解了干旱对农作物植被指数和总初级生产力的消极影响[16],根据历史资料,2014 年德州市出现严重干旱,降水量为研究期间最低值,但 NDVI 年均值仅下降 0.0092,由宇军对华北地区植被季节性变化的研究[17]指出,农田与非农田的关键影响因素并不相同,农田主要受到灌溉和高程的影响,而非农田区主要受降水的影响。德州地区植被覆盖以农田为主,由此可见,植被生长水分来源受降水和灌溉的共同调控。

德州市植被覆盖变化受水热条件的共同调控,但降水因子的贡献更为突出。这一结论与 Sun *et al.*在中国北方干旱-半干旱区的研究相符,即降水是 NDVI 年际变化的主要驱动因素[18]。

Table 1. Correlation coefficients and significance proportions between NDVI and precipitation, temperature
表 1. NDVI 与降水量、气温的相关性系数及显著性比例统计表

	有效像元数	平均相关系数	显著相关区域比例	显著正相关区域比例	显著负相关区域比例
降水量	9698	0.4277	52.59%	52.56%	0.03%
气温	9727	0.3964	41.75%	41.26%	0.49%



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 3. Spatial distribution of Pearson correlation coefficients between NDVI and precipitation (left) and NDVI and temperature (right) across China during 2003~2022

图 3. 2003~2022 年 NDVI 与降水量(左)、气温(右)皮尔逊相关系数空间分布图

5. 局限性及下一步计划

本文采用的 NDVI 数据的空间分辨率为 1 km,虽能够较好地反映研究区域的植被覆盖度的变化,但较低的空间分辨率制约了从更加精细的尺度对植被覆盖度进行解析的能力。未来,采用更高空间分辨率的数据,以期捕捉精细的城市绿地变化,为县区级的工程实施效果提供较为精准的评估支撑[19]。除此之外,本文并未深入讨论农业管理和人类活动给植被变化带来的影响。

6. 结论

本研究通过分析 2003~2022 年德州市生态环境质量指标 NDVI 和气候因子的时间尺度变化、NDVI 的变化趋势以及 NDVI 与气候因子之间的相关性,得出以下结论:

(1) 德州市 NDVI 总体呈波动下降趋势, 2010 年减速显著提升, 2015 年剧烈波动下降至 0.4405, 植被覆盖状况逐步恶化。

(2) 降水量在 160~1338 mm 之间变化, 年际波动剧烈, 气温变化总体平稳, NDVI 整体呈现退化趋势, NDVI 与降水量变化趋势大致相同, 与气温变化趋势大致相反。

(3) 年均降水量年际波动剧烈, 极高值 1337.67 mm 出现在 2020 年, 极低值 160.45 mm 出现在 2014 年。年均气温变化总体平稳, 年均温为 14.1℃。NDVI 与降水量变化趋势大致相同, 与气温变化趋势大致相反。

(4) NDVI 值处于 0.17~0.60 之间, 整体呈现中部高于东西部的特征。德州市大部分地区 NDVI 变化呈现上升的趋势, 呈现下降趋势的地区主要分布在德城区。植被覆盖度改善、退化的程度并不明显。

(5) NDVI 与降水的相关性整体略高于气温, NDVI 与降水量的相关系数变化范围为-0.5874~0.4277, 与气温为-0.7801~0.8275。除降水影响外, 植被生长对农田灌溉具有一定的依赖性。

参考文献

- [1] 王星, 霍艾迪, 吕继强, 等. 塔里木河干流植被覆盖度动态变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 284-292.
- [2] 于爽, 蒲俊兵, 刘凡, 等. 岩溶碳汇效应对植被的响应研究进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 418-428.
- [3] 敖登, 杨佳慧, 丁维婷, 等. 54 种植被指数研究进展综述[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(1): 13-21+28.
- [4] 彭咏石. 2010-2019 年南昌市 NDVI 时空分布特征分析[J]. 安徽地质, 2022(S2): 147-150.
- [5] 唐吉喆, 徐梦冉, 莫宇, 等. 生态地理分区视角下的辽宁省植被归一化植被指数的时空变化[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3271-3278.
- [6] 蔺星娜, 牛健植, 贾京伟, 等. 张家口清水河上游流域植被指数时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 123-130.
- [7] 石淞, 李文, 翟育潞, 等. 中国东北虎豹国家公园植被 NDVI 时空变化及原因探究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 31-41.
- [8] Peng, S., Ding, Y., Liu, W. and Li, Z. (2019) 1 Km Monthly Temperature and Precipitation Dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 11, 1931-1946. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019>
- [9] 邢愿, 贺中华. 基于 NDVI 的贵州地区植被覆盖时空特征分析[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 84-95.
- [10] 王二丽, 周军其. 1998-2012 年艾比湖流域 NDVI 变化及其气候因子驱动分析[J]. 应用科学学报, 2015, 33(1): 59-69.
- [11] 彭亮, 郑淑文, 何英, 等. 基于 MODIS 的积雪时空变化与 CMADS 气象因子相关性研究——以塔什库尔干河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 53-62.
- [12] 郭亮, 郭子雪, 贾洪涛, 等. 基于皮尔逊相关系数与 SVM 的居民窃电识别[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2023, 43(4): 357-363.
- [13] 夏阳, 李洋洋. 基于遥感和 GIS 的德州市德城区建成区扩展变化及驱动力分析[J]. 高师理科学刊, 2018, 38(11): 49-54, 57.
- [14] 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 等. 土壤微生物群落对全球气候变化响应的研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(4): 1700-1719.
- [15] 周广胜, 王玉辉, 白莉萍, 等. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 692-707.
- [16] 刘莹, 朱秀芳, 徐昆等. 干旱对灌溉和雨养农田生态系统生产力的影响对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(2): 381-390.
- [17] 由宇军, 席小康, 张璐. 华北地区植被季节性变化特征及其影响因素分析[J/OL]. 灌溉排水学报: 1-9. <https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2025132>, 2025-09-29.
- [18] Sun, W., et al. (2019) Relative Contributions of Climate Change and Human Activities to Vegetation Variation in Arid and Semi-Arid Regions of China. *Ecological Indicators*, 107, Article ID: 105606.
- [19] 王超, 侯鹏, 刘晓曼, 袁静芳, 周倩, 吕娜. 中国重要生态系统保护和修复工程区域植被覆盖时空变化研究[J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8903-8916.