

十堰市植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应

孙超作¹, 李 旭², 杨普平^{1*}

¹湖北省十堰市丹江口市气象局, 湖北 丹江口

²丹江口市林业管护中心, 湖北 丹江口

收稿日期: 2026年6月22日; 录用日期: 2026年7月15日; 发布日期: 2026年7月27日

摘 要

基于2005~2024年MOD13Q1-NDVI数据与1 km分辨率气象数据集,采用趋势分析、Hurst指数、Pearson相关分析,系统揭示十堰市植被覆盖时空演变特征,并从年际、空间与月尺度分析NDVI对气温、降水的响应规律。结果表明:① 近20年十堰市年均NDVI呈显著上升趋势,增速为0.024/10a,夏季NDVI最高,冬季增长速率最快;② 空间上NDVI呈“南北山地高、中部河谷低”分布格局,植被改善区集中于汉江沿岸,城镇周边零星退化,整体稳定性强且未来持续向好;③ 从逐年变化来看,NDVI与气温显著正相关,与降水量呈不显著负相关,月际尺度分析表明,生长季内十堰市NDVI受气温的影响并不显著,6~7月当月降水、5月前期降水对植被促进作用显著。

关键词

NDVI, 气候变化, 相关分析, 时滞效应

Spatiotemporal Variation Characteristics of Normalized Difference Vegetation Index and Its Response to Climate Change in Shiyan City

Chaozuo Sun¹, Xu Li², Puping Yang^{1*}

¹Meteorological Bureau of Danjiangkou, Shiyan City, Danjiangkou Hubei

²Danjiangkou Forestry Management and Protection Center, Danjiangkou Hubei

Received: June 22, 2026; accepted: July 15, 2026; published: July 27, 2026

*通讯作者。

文章引用: 孙超作, 李旭, 杨普平. 十堰市植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 林业世界, 2026, 15(3): 780-790. DOI: 10.12677/wjf.2026.153090

Abstract

Based on MOD13Q1-NDVI datasets and 1-kilometer resolution meteorological data from 2005 to 2024, trend analysis, Hurst exponent calculation and Pearson correlation analysis were adopted to systematically explore the spatiotemporal evolution characteristics of vegetation coverage. The response of NDVI to air temperature and precipitation was further analyzed at interannual, spatial and monthly scales. The results show that: (1) The annual average NDVI in Shiyan City has presented a significant increasing trend over the past 20 years with an annual growth rate of 0.024 per decade. NDVI peaks in summer, while its growth rate reaches the maximum in winter; (2) Spatially, NDVI follows a spatial pattern of high values in southern and northern mountainous areas and low values in central river valleys. Vegetation improvement areas are mainly distributed along the Hanjiang River, with sporadic degradation around urban built-up areas; overall vegetation conditions feature strong stability and will keep improving in the future; (3) At the interannual scale, NDVI is significantly positively correlated with air temperature yet insignificantly negatively correlated with precipitation. Monthly-scale analysis indicates that air temperature exerts no remarkable influence on NDVI during the growing season, whereas concurrent precipitation in June~July and Preseason precipitation in May impose prominent positive promoting effects on vegetation growth.

Keywords

NDVI, Climate Change, Correlation Analysis, Time-Lag Effect

Copyright © 2026 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

植被是陆地生态系统的核心组成部分,其生长状态与时空变化直接反映区域生态环境质量[1]。植被在能量流动和物质循环中扮演重要角色,其生长受气候变化影响较大[2]。同样地,植被也会通过水分循环和热量调节影响气候[3]。NDVI(归一化植被指数)作为表征植被覆盖与生长状况的关键指标,不仅计算简便、易获取,而且能在很大程度上反映出地表植被状况,是目前最常用的植被指数[4] [5]。

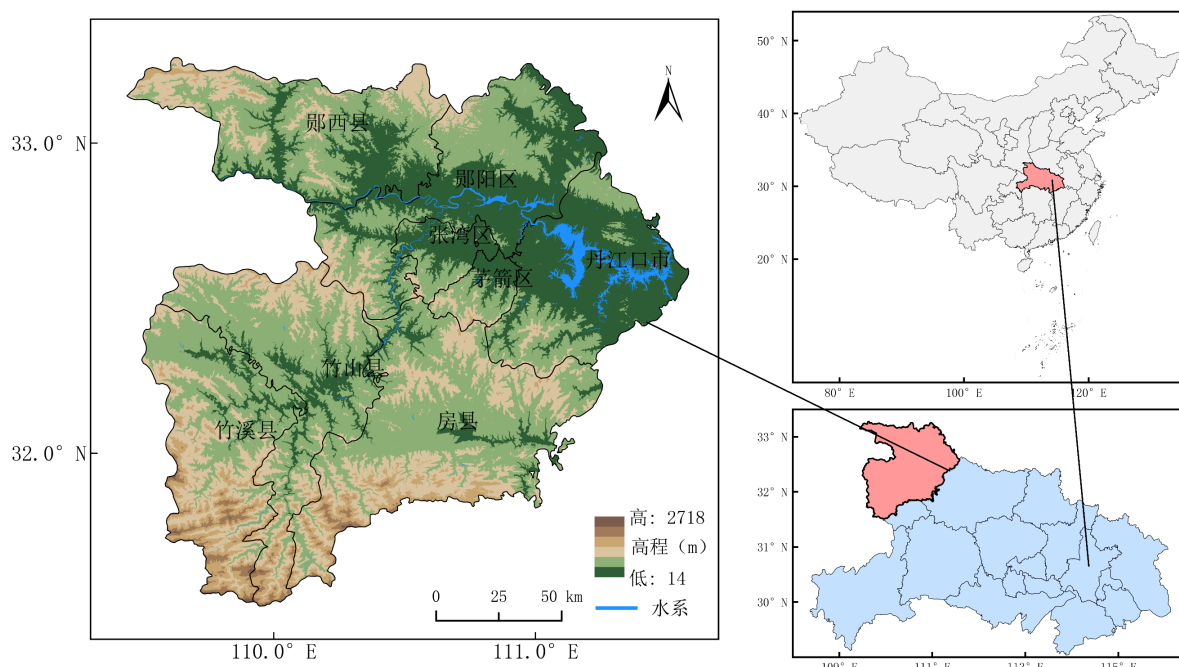
大量研究表明气候变化是影响植被变化的重要驱动因素[6] [7]。热量能够为植被生长提供所需能量,水分是促进植物生长的关键因子,因此气温和降水是影响植被变化的两个主要因素[6] [7],水热作用在时空尺度上具有明显的空间差异性,不同地区影响植被变化的主控因子也有所不同。十堰市地处秦巴山区腹地,是南水北调中线工程核心水源区。历史上,由于工程建设和人类活动的影响,十堰市曾经历大规模森林砍伐,导致局部生态系统退化,尽管近年来实施了一系列生态保护政策,并取得一定成效,但系统性的植被长时序变化研究仍显不足。同时随着全球气候变暖,十堰市气温、降水格局发生显著变化,对植被生长也产生了复杂影响。

基于此,本研究基于卫星遥感的归一化植被指数和气象数据集,采用趋势分析、相关分析等方法,分析 2005~2024 年十堰市 NDVI 时空变化特征及其对气候变化的响应,以期为保障水源地生态安全与可持续发展提供科学支撑。

2. 研究区概况

十堰市位于湖北省西北部,地处秦巴山区,大巴山东段逶迤于南,秦岭余脉屏障其北,汉江自西向

东穿越全境,是我国南水北调中线工程核心水源区,地理坐标为 $109^{\circ}29'\sim 111^{\circ}16'E$, $31^{\circ}30'\sim 33^{\circ}16'N$, 总面积约 2.36 万 km^2 (见图 1)。十堰市地形以山地为主,地势南北高、中间低,属于北亚热带季风气候,四季分明,雨热同期,年均气温 $14.5^{\circ}\text{C}\sim 16.5^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $750\sim 950 \text{ mm}$ 。植被类型以亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林及针阔混交林为主,生态系统类型多样,是水源涵养区的重要组成部分。



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, 下同。

Figure 1. Overview of the study area

图 1. 研究区概况图

3. 数据来源与研究方法

3.1. 数据来源与预处理

3.1.1. 遥感数据

2005~2024 年植被的 NDVI 数据来自美国国家航空航天局(NASA)发布的 MOD13Q1 植被监测产品, 数据时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为 1 km, 通过均值法计算月、四季、年 NDVI。

3.1.2. 气象数据

气象数据(降水量、气温)来源于国家青藏高原科学数据中心, 空间分辨率为 0.0083333° (约 1 km) [8] [9]。研究基于该 1 km 网格气象数据集, 利用矢量边界裁剪法提取十堰地区气象网格数据, 得到十堰地区 1 km 分辨率逐月降水量、平均气温时序网格数据集。

为了便于分析, 利用 ArcGIS 软件将所有栅格数据统一重投影至 WGS 1984 坐标系。

3.2. 研究方法

3.2.1. 趋势分析

采用一元线性回归方程的斜率, 使用一元线性回归方程的斜率分析每个像元的变化趋势。通过趋势分析法对多年研究数据进行拟合, 得到不同研究时段内植被覆盖的空间变化趋势。栅格像元斜率变化的

公式如下：

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n i \bar{V}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \bar{V}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中， n 为年份数量(时间序列为 2005~2024， $n = 20$)； $\bar{V}_i$ 为第 i 年的 NDVI 均值； S 则表示 NDVI 变化斜率。

3.2.2. 相关性分析

本研究采用皮尔逊相关分析(Pearson Correlation Analysis)开展年际序列相关与逐像元空间相关分析，计算 NDVI 与气候因子的相关系数及显著性水平。其计算公式如下：

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

式中： r 为皮尔逊相关系数； x_i 、 y_i 分别为第 i 年的 NDVI 值与对应气温或降水量； $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为研究时段内 NDVI 与气候因子的多年平均值； n 为样本时间序列长度(本研究 $n = 20$)。 $r > 0$ 时，二者呈正相关； $r < 0$ 时，二者呈负相关； $|r|$ 越趋近于 1，表明线性相关程度越强，越趋近于 0 则相关性越弱。

4. 结果与分析

4.1. 十堰市 NDVI 时空变化特征

4.1.1. 时间变化特征

2005~2024 年十堰市年、季 NDVI 的变化趋势如图 2 所示。近 20 年，十堰市年平均 NDVI 整体呈缓慢上升趋势，增长率为 0.024/10a，植被状况逐步改善；多年平均 NDVI 为 0.605，最高值为 0.645，出现在 2024 年，最低值为 0.567，出现在 2020 年。其中，春季、夏季、冬季 NDVI 均呈缓慢增加趋势，通过显著性水平检验($p < 0.05$)，秋季 NDVI 变化趋势不明显($p > 0.05$)。

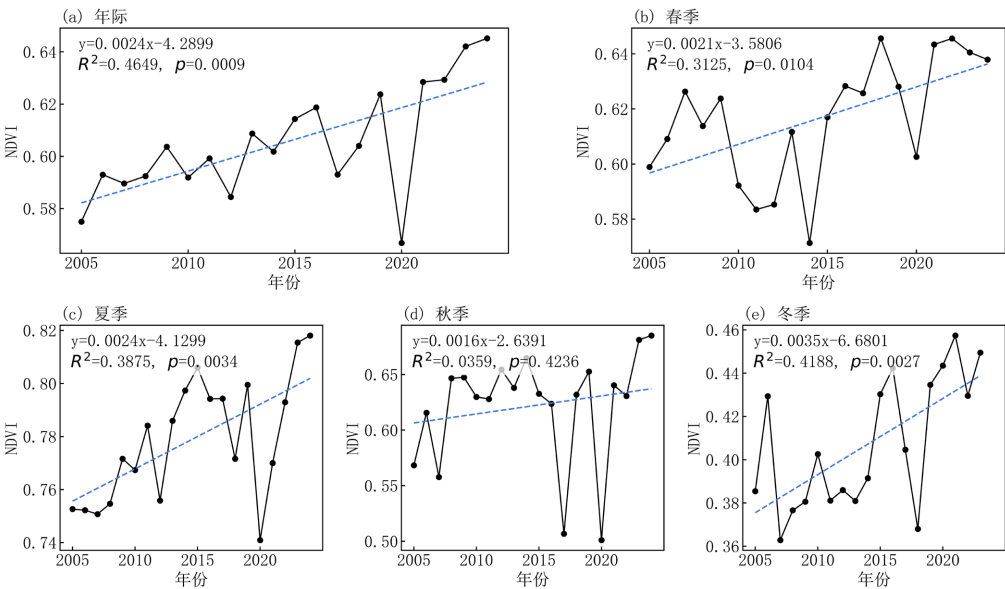


Figure 2. Trend of NDVI values for Shiyan City from 2005 to 2024, including annual and seasonal variations
图 2. 十堰市 2005~2024 年年际及四季 NDVI 值变化趋势

对比四季,研究区位于亚热带季风气候内,夏季受水热条件匹配最优影响,NDVI 年均绝对值为全年最高,是植被覆盖状况最好、植被生长最为旺盛的时段;而冬季受气候变暖与生态修复工程的共同驱动,NDVI 增长速率居四季首位,植被覆盖改善趋势最为突出,提升幅度显著高于其他季节。

4.1.2. 空间分布特征

十堰市植被 NDVI 整体呈“中部河谷低、南北山地高”的分布格局,高值区主要集中在十堰市西南部的大巴山区、中部武当山周边及最北端的秦岭余脉,低值区分布在十堰市主城区及各县城、河流湖泊等水域(如图 3)。研究区植被生长状况较好,整个区域的 NDVI 最大值为 0.732,平均值为 0.605,90%以上的区域 NDVI 值在 0.5 以上,其中 NDVI 值在 0.6~0.7 的面积占比超过了研究区面积的三分之二。

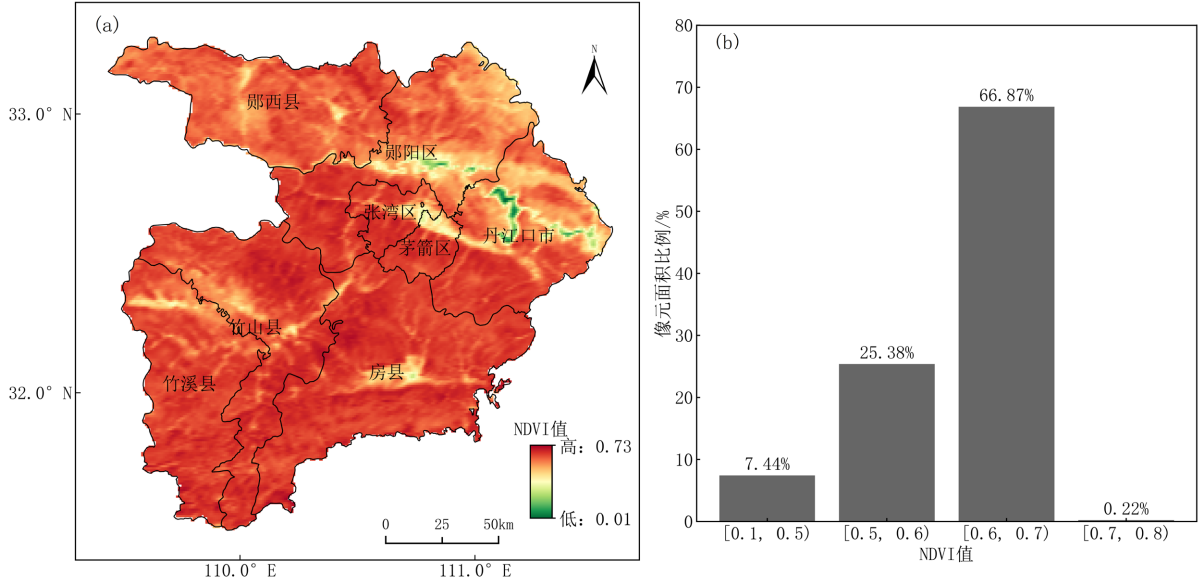


Figure 3. Spatial distribution (a) and pixel proportion (b) of the average NDVI values in Shiyan City from 2005 to 2024
图 3. 十堰市 2005~2024 年平均 NDVI 值的空间分布(a)及像元占比(b)

4.1.3. 空间变化特征

十堰市 2005~2024 年 NDVI 值空间变化趋势如图 4 所示,在过去 20 年十堰市 22.28%的区域植被覆盖情况得到明显改善,主要分布在汉江河谷的郧西县、郧阳区、丹江口市;基本稳定区域占 38.66%,主要分布在茅箭区南部及南部三县(竹山县、竹溪县、房县);轻微及严重退化区域占比 1.47%,主要点状分布在十堰及各县主城区。变化趋势及分级标准见表 1。

Table 1. Grading standards for NDVI change trend in Shiyan City from 2005 to 2024
表 1. 十堰市 2005~2024 年 NDVI 变化趋势分级标准

NDVI 变化趋势	斜率(S)与显著性判定条件	像元面积占比(%)
严重退化	$S \leq -0.004, p < 0.05$	0.83%
轻微退化	$-0.004 < S \leq -0.001, p < 0.05$	0.64%
基本稳定	$-0.001 < S \leq 0.001$ ($P < 0.05$)或 $p \geq 0.05$	38.66%
轻微改善	$0.001 < S < 0.004, p < 0.05$	37.60%
明显改善	$S \geq 0.004, p < 0.05$	22.28%

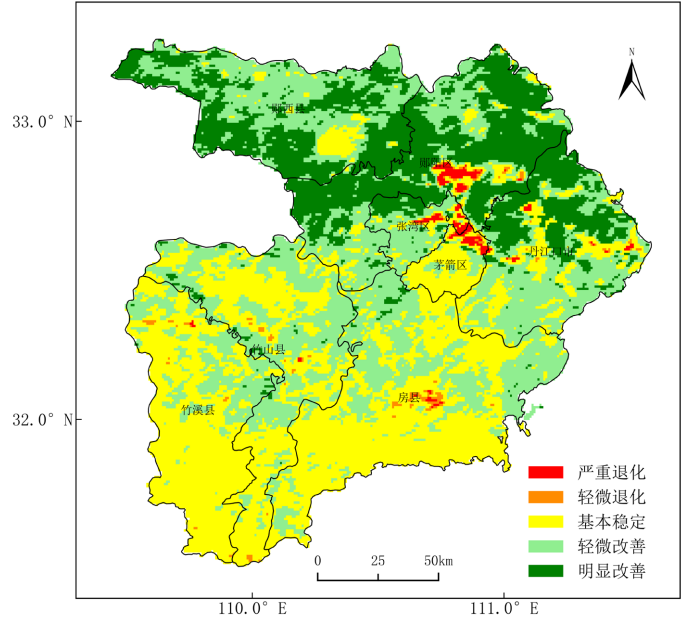


Figure 4. Trend of NDVI values in Shiyan City from 2005 to 2024
图 4. 十堰市 2005~2024 年 NDVI 值的变化趋势

4.1.4. 时序稳定性分析

十堰市 2005~2024 年 NDVI 值平均变异系数为 0.05，这表明研究期间十堰市 NDVI 值变化总体极其稳定。全市超过 70%的区域 NDVI 变异系数低于 0.054，说明大部分地区植被状态稳定，受干扰程度低。其中最低波动区(变异系数 ≤ 0.047)占比高达 52.61%，主要集中在南部的竹溪县、竹山县、房县和丹江口市西南部，这些区域以林地为主，生态本底好，植被年际变化极小。适中波动区占比 26.55%，主要分布在郧西县、郧阳区和丹江口市北部，多为农林交错带，受人类活动和局地气候影响，NDVI 存在一定波动。较高与最高波动区占比仅 2.72%，呈点状或小片状分布在汉江河谷、十堰市主城区及各地县城，这些区域受水体面积变化、城镇化、农业开发和人为干扰影响，植被覆盖变化剧烈，稳定性较差(见图 5(a))。

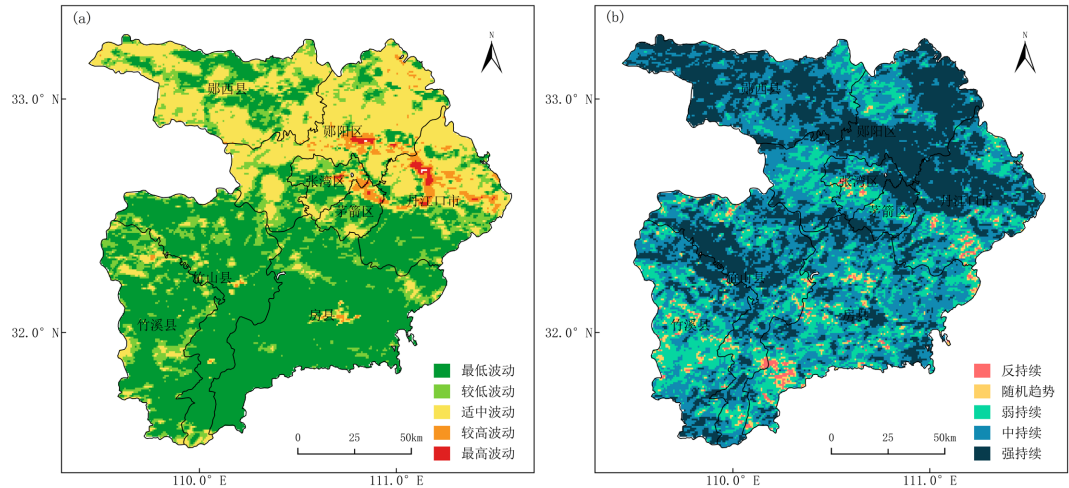


Figure 5. Spatial distribution of the coefficient of variation (a) and Hurst index (b) of NDVI values in Shiyan City from 2005 to 2024
图 5. 十堰市 2005—2024 年 NDVI 值变异系数空间分布(a)及 Hurst 指数空间分布(b)

分析发现, 研究期间十堰市 73.24%的区域 Hurst 指数 ≥ 0.65 , 广泛分布于全市, 呈现中等到强持续状态。同时, 仅不足 4%的区域表现出反持续或随机趋势, 说明十堰市植被生态系统的变化方向明确, 几乎不存在趋势逆转的风险, 未来生态恢复的整体态势十分稳固(见图 5(b))。变异系数及 Hurst 指数分级标准见表 2。

Table 2. Classification standards for NDVI variation coefficient and Hurst exponent in Shiyan City from 2005 to 2024
表 2. 十堰市 2005~2024 年 NDVI 变异系数及 Hurst 指数分级标准

NDVI 变异系数 分级	取值区间	像元面积占比 (%)	Hurst 持续性 分级	取值区间	像元面积占比 (%)
最低波动	[0.000, 0.047]	52.61	反持续	$H < 0.5$	0.93
较低波动	(0.047, 0.054]	17.41	随机趋势	0.5~0.55	2.75
适中波动	(0.054, 0.087]	26.55	弱持续	0.55~0.65	22.38
较高波动	(0.087, 0.250]	2.32	中持续	0.65~0.75	38.19
最高波动	(0.250, 1.100]	0.40	强持续	$H \geq 0.75$	35.05

4.2. 十堰市气温、降水时空变化特征

2005~2024 年十堰市年均气温呈显著上升趋势($p < 0.05$), 其增速为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。近 20 年十堰市的降水呈减少趋势, 其减速为 $22.3\text{ mm}/10\text{a}$, 但降水量年际波动较大, 降水减少趋势不显著($p > 0.05$) (图 6)。

从空间分布上看, 十堰市各地平均气温在 5.0°C ~ 17.1°C 之间, 空间上呈北高南低、河谷高山区低的格局(图 7(a))。高值区集中在郧阳区、丹江口市、郧西县北部及房县河谷地带; 低值区则主要分布在竹溪县、竹山县及房县南部的高海拔山区。各地年平均降水量在 $811.0\sim 1268.3\text{ mm}$ 之间, 空间上呈南多北少、山区多河谷少的分布特征(图 7(b))。

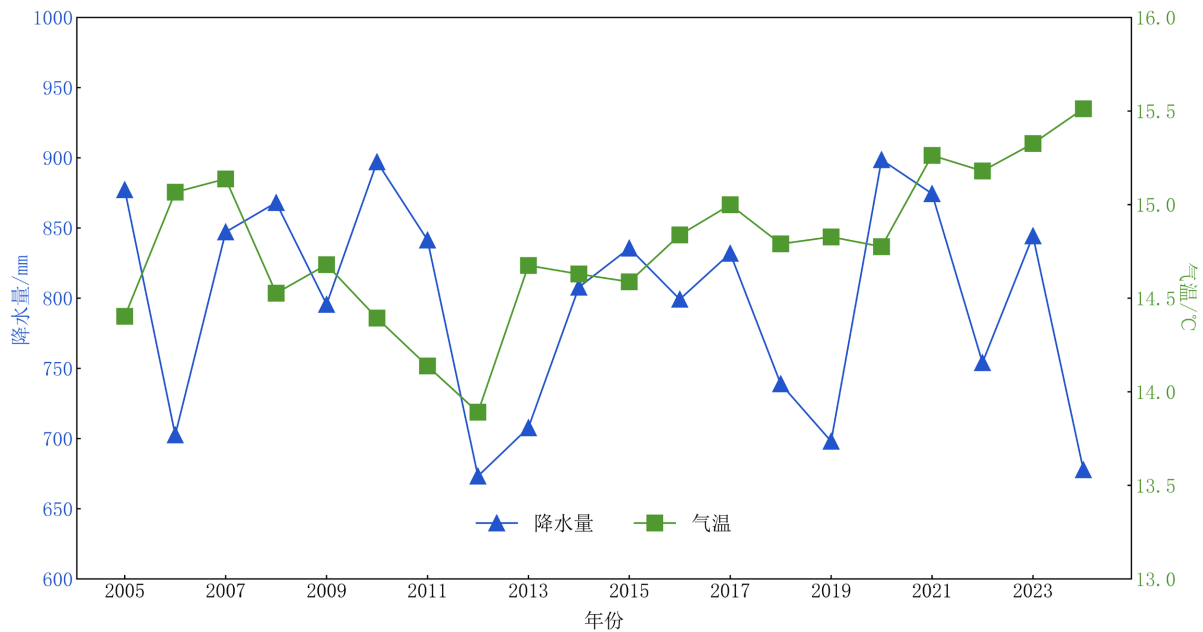


Figure 6. Interannual variation trends of temperature and precipitation in Shiyan City from 2005 to 2024
图 6. 十堰市 2005~2024 年气温和降水年际变化趋势

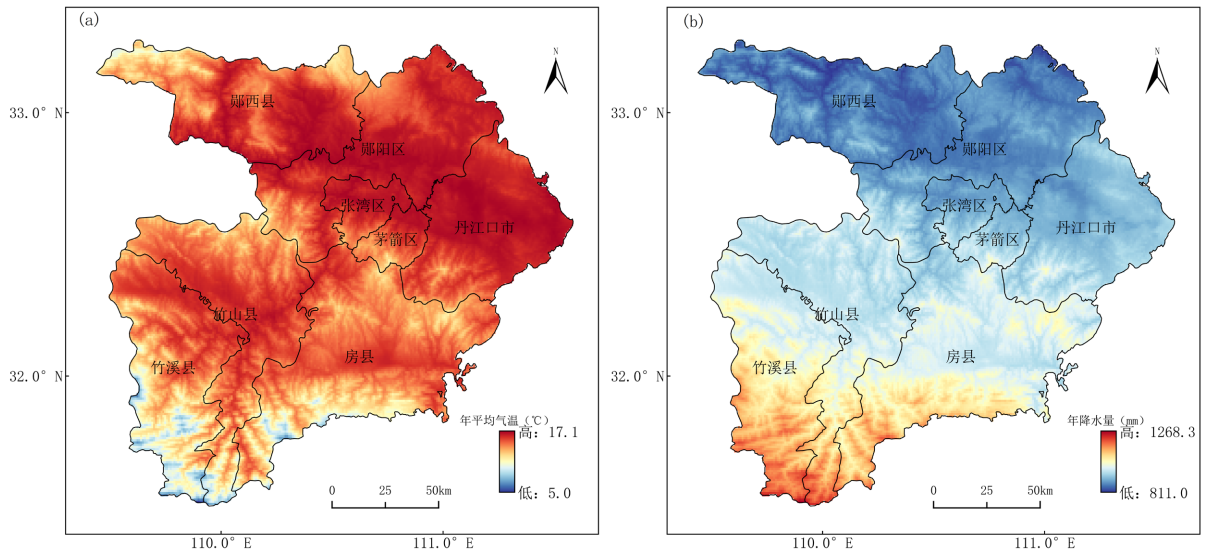


Figure 7. Spatial distribution of temperature (a) and precipitation (b) in Shiyan City from 2005 to 2024
图 7. 十堰市 2005~2024 年气温(a)和降水(b)的空间分布

4.3. 十堰市 NDVI 对气候变化的响应

从年际变化特征来看，2005~2024 年十堰市 NDVI 与同期气温呈显著正相关关系($p < 0.05$; 图 8(a))，与降水量呈负相关关系但未通过显著性检验($p > 0.05$; 图 8(b))。这表明研究时段内气温升高对十堰市植被整体生长具有明显的促进作用，热量条件的改善是驱动植被 NDVI 年际提升的核心气候因子；年际尺度下降水对植被长势的调控作用相对微弱，降水的年度波动未对区域植被生长形成显著的促进或抑制效果，十堰市植被生长的水分环境整体稳定且适宜，未出现明显的水分胁迫问题。

从空间分布上看，十堰市 NDVI 与气温整体以正向关联为主(图 9(a))，全区 97.89%的区域表现为气温与 NDVI 正相关，其中 48.84%的区域达到显著相关水平($p < 0.05$)，表明气温升高对十堰市绝大部分区域植被生长具有普遍促进作用。NDVI 与降水则以负相关格局占主导(图 9(b))，87.25%的区域呈现负向关联，仅 13.56%的区域通过显著性检验($p < 0.05$)，说明十堰市整体水分条件对植物生长而言较为充足，过量降水易引发光照减弱、土壤过湿等问题，进而对植被生长产生一定抑制效应。

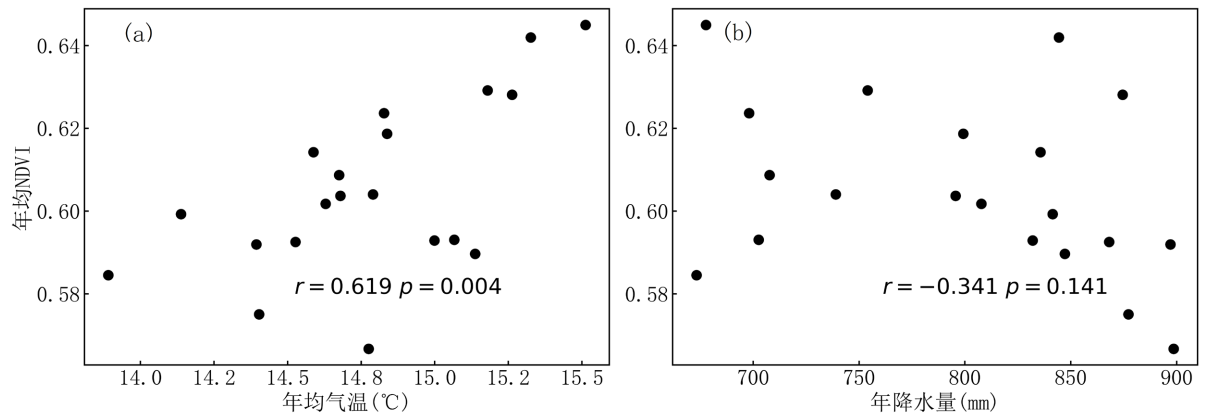


Figure 8. Correlation between NDVI and temperature (a), precipitation (b) in Shiyan City from 2005 to 2024
图 8. 十堰市 2005~2024 年 NDVI 与气温(a)、降水(b)的相关关系

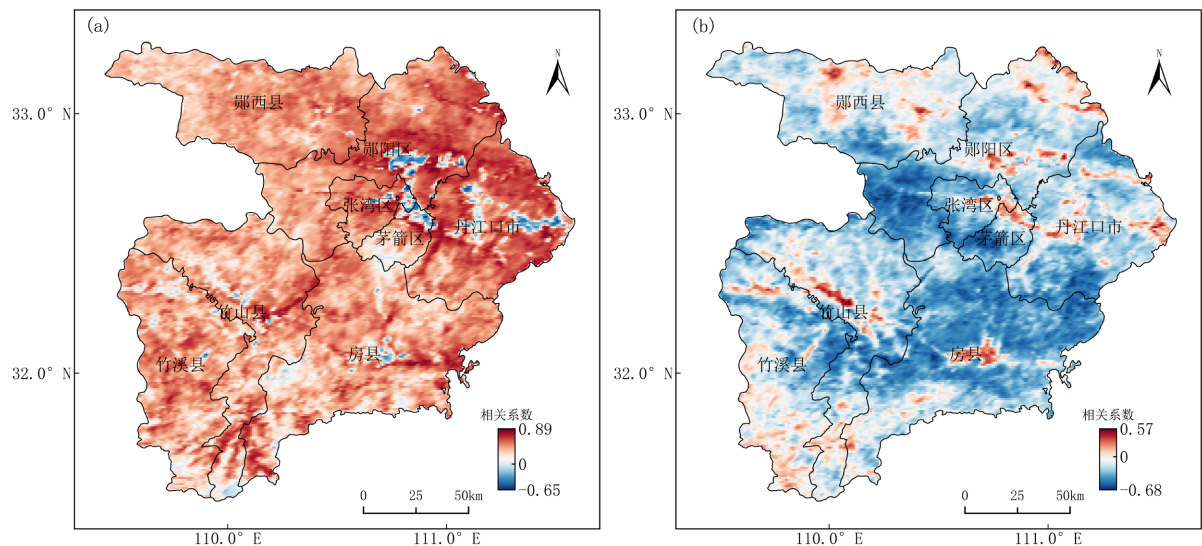


Figure 9. Spatial distribution of correlation coefficients between NDVI and temperature (a), precipitation (b) in Shiyan City from 2005 to 2024

图 9. 十堰市 2005~2024 年 NDVI 与气温(a)、降水(b)相关系数空间分布

为进一步研究十堰市 NDVI 对气候变化的时滞效应,对 2005~2024 年生长季(5~9 月)逐月的 NDVI 值与当月以及前 1、2、3 月的气候因子进行了双变量相关性分析。研究发现,十堰市 NDVI 与气温、降水的响应关系存在显著的季节分异与时间滞后效应(见表 3)。当月降水对 6 月、7 月植被生长呈现显著正向影响,相关系数分别为 0.638、0.457,表明生长旺季初期的降水补给可有效促进植被光合生长,提升区域植被覆盖水平。滞后 1 个月降水仅在 5 月表现出显著正相关($r=0.477$),体现出春季植被生长对前期水分补给的滞后响应特征。气温因子则整体以累积滞后效应为主,其中滞后 3 个月气温在 6 月呈显著正相关($r=0.516$),反映出春季累积热量条件对初夏植被生长具有持续性的促进作用。

Table 3. Correlation coefficients between monthly NDVI during the growing season and temperature and precipitation in the previous 0~3 months in Shiyan City from 2005 to 2024

表 3. 十堰市 2005~2024 年生长季内月 NDVI 与前 0~3 月气温、降水的相关系数

气候因子	相关系数				
	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
T0	0.108	0.267	0.407	0.179	0.161
P0	0.038	0.638*	0.457*	0.091	0.06
T1	0.151	0.073	0.111	0.125	0.226
P1	0.477*	0.034	0.074	0.268	0.397
T2	0.167	0.327	0.114	0.189	0.062
P2	0.186	0.248	0.186	0.075	0.022
T3	0.046	0.516*	0.362	0.044	0.024
P3	0.178	0.165	0.017	0.382	0.449

注: T 表示气温, P 表示降水; 0、1、2、3 分别表示当月、前 1、2、3 月; *表示通过 $p < 0.05$ 显著性检验。

5. 讨论

2005~2024 年十堰市 NDVI 整体呈显著上升态势,年均气温与 NDVI 显著正相关,年降水量与 NDVI

相关性未达到显著性水平, NDVI 年际稳定性存在明显空间分异, 全域植被演化以正向持续性为主; 该变化趋势与秦巴山区大范围植被整体改善规律一致[10], 但十堰地处秦巴山东段、汉江丹江口水源核心管控区, 生态约束力度更强, 植被提升速率整体略优于秦巴山西段[11]。从流域格局来看, 汉江流域普遍表现为上游山地 NDVI 增速高于中下游城镇平原区[12], 与本研究空间格局匹配, 流域年均降水总量整体充裕, 不再是植被限制性因子, 降水年内分配、极端暴雨洪涝扰动才是调控植被年际波动的关键, 这也解释了本区域年尺度降水总量与 NDVI 总体无显著相关的内在成因。

本研究在分析十堰市 NDVI 值的时空变化影响因素时, 仅考虑了气温、降水等气候因素, 而植被 NDVI 值的变化不仅受气候因素的影响, 还受到人类活动对植被覆盖情况的影响。例如, 城市化、道路建设和森林砍伐等人类活动导致植被覆盖下降。因此, 未来将综合考虑人类活动等多种因素对植被变化的影响, 以探究长时间序列下植被覆盖的时空变化及其响应。

6. 结论

(1) 2005~2024 年十堰市年均 NDVI 呈上升趋势, 增长率为 0.024/10a。夏季植被生长最为旺盛, NDVI 绝对值最高; 冬季 NDVI 增速居四季首位, 春、夏、冬季均呈显著上升趋势, 秋季变化趋势相对平缓。同期气温上升趋势显著, 降水年际波动大、变化不显著。

(2) 十堰市 NDVI 空间分异显著, 整体呈南北高、中部低, 山地高、河谷城镇低的分布特点, 高值区集中于西南部大巴山区与北部秦岭余脉, 低值区主要分布于城镇建成区及水域。植被改善区域占 59.88%, 主要位于汉江河谷地带; 退化区域占比仅 1.47%, 呈点状分布于城区周边。全市 NDVI 平均变异系数低、Hurst 指数以强持续为主, 植被覆盖稳定性强, 未来持续改善趋势明确, 生态系统恢复态势稳固。

(3) 从逐年变化来看, NDVI 与气温呈显著正相关, 与降水呈不显著负相关。空间尺度上, NDVI 与气温以正相关为主, 与降水以负相关为主, 多数区域未通过显著性检验。月际尺度上, 生长季内气温对 NDVI 的影响不显著, 降水以即时补给与短期滞后促进为主, 6~7 月当月降水、5 月前期降水对植被促进作用显著。

参考文献

- [1] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法[J]. 生态学报 2001, 21(11): 1885-1892.
- [2] 孙守琴, 谢汶天, 胡兆永, 等. 亚高山森林树木生长响应气候变化研究的前沿和挑战[J]. 气候变化研究进展, 2025, 21(2): 198-207.
- [3] 赵东升, 王珂, 崔耀平. 植被变化对气候的反馈机制及调节效应[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7830-7840.
- [4] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 327-333.
- [5] 崔利芳, 许馨, 牛自耕, 等. 武汉都市圈植被 NDVI 变化特征及其对气候变化的响应[J]. 黄冈师范学院学报, 2023, 43(3): 42-48.
- [6] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379-384.
- [7] 侯美亭, 赵海燕, 王笋, 等. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 353-364.
- [8] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集 (1901-2025) [EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. <https://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/faac7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2>, 2026-07-11.
- [9] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月平均气温数据集 (1901-2025) [EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. <https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpdac.270961>, 2026-07-11.
- [10] 董庆栋, 陈超男, 殷浩然, 等. 秦巴山地植被绿度特征及其对地表水热的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1090-1101.

- [11] 陈超男, 王丽园, 朱文博, 等. 秦巴山地极端气候变化特征及其对植被动态的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 276-287.
- [12] 王竹, 张冠华, 王一帆, 等. 汉江流域植被覆盖变化响应阈值与调控对策[J]. 中国水利, 2025(18): 59-67, 72.