

DOI: 10.5846/stxb202202190399

马超, 崔珍珍, 李婷婷, 彭杨钊. 中国“平原-山地”地形过渡带 NDVI 时空变异与气候响应. 生态学报, 2023, 43(5): 2141-2157.

Ma C., Cui Z. Z., Li T. T., Peng Y. Z. Spatio-temporal variation and its response to climate change of NDVI in the terrain transition zone, China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2141-2157.

中国“平原-山地”地形过渡带 NDVI 时空变异与气候响应

马 超^{1,2,3}, 崔珍珍¹, 李婷婷¹, 彭杨钊^{4,*}

1 河南理工大学, 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003

2 河南理工大学, 自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室, 焦作 454003

3 河南理工大学, 黄河流域耕地保护与城乡高质量发展研究中心, 焦作 454003

4 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 地理空间信息学院, 郑州 450001

摘要: 研究地形过渡带植被的地形效应、边缘效应, 及其对纬度、气候变化的响应, 将为我国山地生态格局和资源禀赋的深层认知提供地学参考。利用 1982—2015 年第三代全球库存建模和制图研究归一化植被指数数据集 (GIMMS NDVI3g v1) 和年均气温、降水等气象数据, 分别进行最大值合成、趋势分析、突变分析、变异分析和相关分析, 揭示了中国近南北走向的“平原-山地”地形过渡带 (简称“地形过渡带”) 植被物候的时空变化规律及对气候变化的响应特征。研究表明: (1) “地形过渡带”跨越一年三熟的低纬度地区, 到一年两熟的中纬度地区, 再到一年一熟的高纬度地区的周期性植被物候特征区; (2) 34 年间, 年际 NDVI 整体呈增长趋势, 其中植被改善区域占 58.84%; 年内分析表明“地形过渡带”植被生长期 (LOS) 变化率 -3.16 d/纬度; (3) 34 年间“地形过渡带”的年均气温呈现升高趋势, 每 10 年上升速率为 $0.098-0.386$ °C 之间; 年均降水呈现减少趋势, 每 10 年下降速率为 $8.29-31.82$ mm; (4) 34 年间 NDVI 变异系数结果表明, 研究区 NDVI 低波动变化和相对较低波动变化的面积占比达 95.52%, 说明研究区植被呈稳中向好趋势; (5) NDVI 与年均气温的相关性随着纬度的升高而减弱, 表明南方植被对气温变化敏感; NDVI 与年均降水量的相关性随着纬度的升高而升高, 表明北方植被对降水变化敏感。

关键词: 地形过渡带; 第三代全球库存建模和制图研究归一化植被指数 (GIMMS NDVI3g v1); 地形效应; 边缘效应; 趋势分析; 相关性分析; 变异分析

Spatio-temporal variation and its response to climate change of NDVI in the terrain transition zone, China

MA Chao^{1,2,3}, CUI Zhenzhen¹, LI Tingting¹, PENG Yangzhao^{4,*}

1 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

2 Key Laboratory of Spatio-temporal Information and Ecological Restoration of Mines (MNR), Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

3 Research Centre of Arable Land Protection and Urban-rural High-quality Development in Yellow River Basin, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

4 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Due to its huge differences in longitude, latitude, and elevation, the transition zone between the second and third steps provides a unique natural profile for basic environmental research on physical geography and human settlements in mainland China. In terrain transition zone, the topographic and marginal effects of vegetation, and their responses to latitude and climate change will provide a geographical reference for in-depth understanding of the ecological pattern and

基金项目: 国家自然科学基金-河南区域创新发展重点资助项目 (U21A20108); 河南省高校科技创新团队支持计划项目 (22IRTSTHN008)

收稿日期: 2022-02-19; **网络出版日期:** 2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: d_insar@126.com

resource endowment of mountainous areas in China. Based on the GIMMS NDVI3g v1 dataset, annual mean temperature and precipitation data from 1982 to 2015, combined with the maximum value synthesis, trend analysis, mutation analysis, variation analysis, and correlation analysis, this paper reveals the spatiotemporal variation trend and response characteristics to climate change of vegetation phenology in terrain transition zone of “plain-mountain” near the north-south direction between the second and third steps of China. The results show that: (1) The terrain transition zone is a periodical vegetation phenological characteristic region which spans the low-latitude region with three crops a year, the mid-latitude region with two crops a year, and the periodic vegetation phenology zone in the high-latitude region with one crop a year; (2) During 34 years, the inter-annual NDVI showed an increasing trend, of which the vegetation improvement area accounted for 58.84%; the inner-annual analysis showed that the vegetation growth period (LOS) change rate of the terrain transition zone was -3.16 d per latitude; (3) The annual average temperature of the terrain transition zone in the 34 years showed an increasing trend with an increase rate from 0.098 °C to 0.386 °C per 10 a, while the annual average precipitation showed a decreasing trend with a decrease rate from 8.29 mm to 31.82 mm per 10 a; (4) The NDVI variation coefficient analysis showed that low volatility change area and relatively low volatility change area accounted for 95.52%, presenting a stable and positive trend; (5) The correlation between NDVI and annual mean temperature decreased as latitude increased, indicating that southern vegetation was sensitive to temperature changes; while the correlation between NDVI and annual mean precipitation increased as latitude increased, indicating that northern vegetation was sensitive to precipitation changes. Vegetation distribution and climate change in terrain transition zone of “plain-mountain” have topographic effects; In the mountain-plain junction zone, due to the human-land conflict caused by urban expansion, the vegetation distribution around the city has a marginal effect.

Key Words: terrain transition zone; GIMMS NDVI3g v1; topographic effect; marginal effect; trend analysis; correlation analysis; variation analysis

地带性和边缘性是地理世界的重要特征,它蕴含着自然地理与人文地理变迁^[1-2]。中国东西方向的“平原-山地”地形过渡带(简称“地形过渡带”)连通大兴安岭、燕山山脉、太行山脉、伏牛山地和雪峰山脉系,是中国二、三级阶梯分界线。与中国南北过渡带相较,“地形过渡带”作为自然地理的过渡地带之一,必然具有对气候变化的敏感性^[3],其巨大的经纬度差异和地形梯度为研究中国中、东部的环境变化提供了一个宏大尺度的实验场。中国东西“地形过渡带”作为一个伴随华夏文明新兴的文化与自然地理交错区域^[4],具有重要的自然地理、人文地理、经济地理、生态地理和生态人类学地位。纵贯中国南北的“地形过渡带”,在东北是草原向森林的生态过渡带^[5],在北方是农耕与游牧的文化过渡带^[6];在中部是干旱与湿润的气候过渡带^[7];在西南是红壤丘陵向石漠化山地的过渡带^[8]。孕育了东北渔猎文化和狩猎文化^[9]、华北粟作文化^[10]、江南稻作文化^[11]和西南刀耕火种^[12]等丰富多彩的多元民族文化。在近现代,“地形过渡带”因其山前冲洪积区肥沃的土质,充裕的日照,丰沛的降水,发展建设出众多战略纵深型的重要工业城市^[13],更由于采矿、冶炼、垦植等活动繁盛,导致人-地冲突剧烈^[14],自然资源破坏严重^[15],山地自然灾害频发^[16]。因此,开展“地形过渡带”植被动态响应全球气候变化的研究,对中国及东北亚地区生态系统演变、生态环境保护以及防灾减灾等具有重要意义。

陈述彭院士曾经指出,遥感是地球信息科学的数据基础,没有遥感就没有全球变化科学^[17]。遥感科学具有大范围、长时序的技术优势,为全球中、大尺度植被变化监测对全球气候变化的响应提供了技术手段^[18]。在植物的生长监测方面,归一化植被指数(NDVI)对植被的生长量和长势十分敏感,是反映地表植被生长状况的重要指标,因此在定性和定量评价植被覆盖及其生长活力时被作为重要的信息源^[19]。全球中、大尺度植被变化监测数据集(即 NOAA AVHRR NDVI、MODIS NDVI、SPOT Vegetation)中,AVHRR NDVI 时序最长,特别是全球库存建模和制图研究(GIMMS)NDVI 数据集历经 NDVIg、NDVI2g、NDVI3g 三代并仍持续保持数据和定标算法的更新,因此科学贡献颇丰。例如基于 GIMMS NDVIg、2g、3g 的全球植被动态分析^[20-21],全球绿度与褐化趋势分析^[22],北半球植被对气候变化的季节性响应^[23],亚洲植被绿度与气候的相关性^[24],中国区 GIMMS NDVI3g 时空分布状况及空间变化率及其对气候变化^[25]和极端气候的响应^[26],青藏高原植被对气候变化的

响应^[27],新疆地区植被生长趋势^[28],鄂尔多斯植被动态及气候响应^[29],可可西里自然文化遗产保护区植被变化与气候响应等^[30]。同样,得益于遥感技术及 GIMMS NDVI 数据,宏观人文与地理带生态环境变化的研究得以实现,如北美阿巴拉契亚生态廊道^[31],中国农牧交错带^[32],中国三北防护林工程区植被覆盖动态变化^[33],横跨赤道非洲的萨赫勒景观边缘效应^[34],为揭示跨越巨大时空的地带生态系统时空演变规律研究提供了重要的参考信息。

中国拥有世界上最为宏大人文与自然地理带之一——中国东西方向的“平原-山地”“地形过渡带”,为中国全球变化物候研究提供了一个天然剖面。最近发布的 GIMMS NDVI3g v1 (1982—2015 年) 数据集见证了中国区域生态环境、生产方式的重大变革,基于这一数据结合同期的地形、气候数据,研究这一综合地理带的植被长时空变化以及在全球变化下的自然演变规律,无论从再现 34 年来社会生产方式变革带来的区域生态环境变化,还是从理解陆地生态系统与气候变化的相互关系角度来说,获得的认识将是前所未有的,对评估、促进跨区域环境、经济、社会的可持续发展将无可替代。研究拟通过分析“地形过渡带”地表物候响应地形、纬度与气候变化的时空格局,挖掘“地形过渡带”的植被覆盖、时空差异与气候响应规律,旨在为区域生态环境改善以及生态植被恢复的政策制定提供依据,同时为中国及东北亚地区地球系统科学的深层认知提供地学参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区

在地理信息系统(GIS)平台支持下,建立以 300 m 等高线为中心,64 km 为半径的地形带,确定本次研究区范围,即中国“平原-山地”过渡带的范围。北北东-南南西(NNE-SSW,方位角约 212°)走向的“地形过渡带”其地理位置大致为 25°59′—48°49′N,111°4′—124°43′E,北起黑龙江省讷河市,南到湖南省永州市。途经黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、北京、天津、河北、山西、河南、湖北、湖南和广西 12 个省市自治区,总长 2900 余 km,总面积逾 50 万 km²(图 1)。

由于“地形过渡带”纬度差异较大,纬度影响下的植被和气候分布特征和变化特征较为显著,所以将研究区按纬度每 5°划分一个子区间,共分为 25°—30°N, 30°—35°N, 35°—40°N, 40°—45°N, 45°—50°N 这 5 个子区间,对每一个子区间进行对比分析。

1.2 数据

先进甚高分辨率扫描辐射仪(AVHRR)NDVI 数据是目前为止覆盖时间最长的全球连续数据集^[35—36]。GIMMS NDVI3g v1 是美国国家航空航天局公布的第三代长时间序列 GIMMS AVHRR NDVI 数据集(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/>) NDVI3g v0 (1981-07—2013-12) 的增强版,起止时间是 1981 年 7 月到 2015 年 12 月。该数据集采用 1984 世界大地坐标系(World Genodetic System 1984, WGS-84),等经纬度投影,时间分辨率为 15 d,空间分辨率是 0.0833°(1/12°×1/12°),数据集来自于 NOAA/AVHRR 系列卫星(NOAA7、NOAA9、NOAA11、NOAA14、NOAA16、NOAA17、

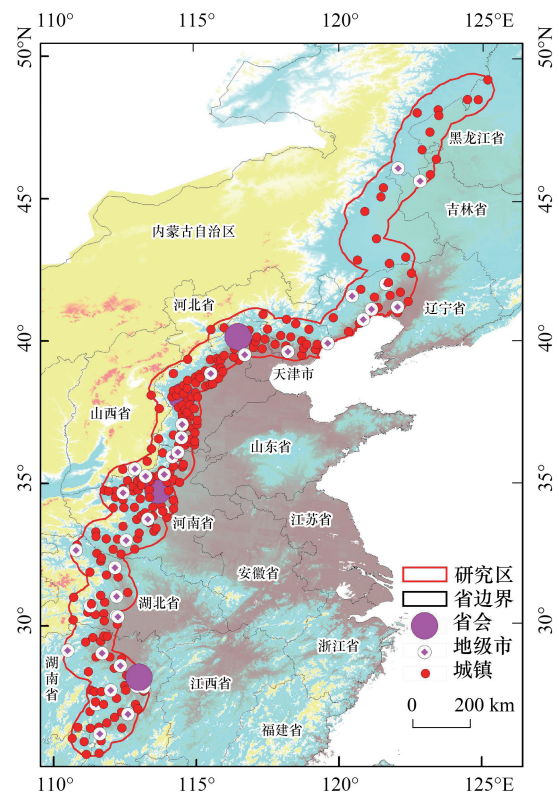


图 1 中国“平原-山地”地形过渡带地理位置图

Fig.1 The geographical location of the Plain-mountain transition zone in China

NOAA18、NOAA19),在发布之前,该数据集已经做过了大气校正、几何粗校正、几何精校正、删除坏线和消除火山爆发的影响,除此之外考虑到全球范围因素,还对数据集做了短期大气气溶胶及云层覆盖的影响等处理,保证了数据的质量^[22]。在全球植被研究中,该数据被认为是最有价值的数据源之一,在大尺度植被研究中具有很好的适用性^[21,37]。

气象数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心提供的气候资料年值数据集(1982—2015年)(<http://www.resdc.cn>)。后处理将该气象数据(1982—2015年)用 ArcGIS[®]插值为与 GIMMS NDVI 数据相同的空间分辨率,得到全国年均气温、年度总降水量气候数据,再利用矢量数据对气温、降水数据进行批量裁剪,获得“地形过渡带”分辨率为 8 km × 8 km 的年均气温和总降水量图像。

高程数据来源于美国地质调查局全球 30 弧秒数字高程模型(USGS GTOPO30 DEM)(<ftp://edcftp.cr.usgs.gov/data/gtopo30/global/>)数据,分辨率为 900 m。

2 研究方法

GIMMS NDVI3g v1 是利用最大值合成法(MVC)生成的半月合成数据,研究利用生成的“地形过渡带”矢量边界对 GIMMS NDVI 数据批量裁剪,然后采用最大值合成法(MVC)获取“地形过渡带”每月、每年的 NDVI 最大值数据 $NDVI_{max}$,最后对得到的每月、每年 NDVI 数据进行区域平均计算($\sum NDVI_{max}/n$),获得研究区月度、年度 NDVI 最大值均值,形成以下分析的数据基础。

2.1 高斯拟合

高斯函数是表示连续随机变量的概率密度函数,它通常用于表达自然物候的周期性演变^[38]。函数(双峰型)的表达式如下:

$$y = y_0 + \frac{A_1}{w_1 \times \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{2(x-x_{c1})^2}{w_1^2}} + \frac{A_2}{w_2 \times \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{2(x-x_{c2})^2}{w_2^2}} \quad (1)$$

式中, y_0 是基线的偏移量。 A_i 是钟形曲线下的积分面积(此处, A_i 等效 NDVI 生物量,见 3.1.3 节)。 x_{ci} 是峰值点所在的位置。 $w_i = 2\sigma$ 大约等于峰高一半处宽度的 0.849 倍(当峰高为 1/2 时,钟形曲线的宽度),该值表示植被生长繁茂时的生长期的长度。

2.2 趋势分析

一元线性回归分析能够模拟每个像元的 NDVI 变化趋势,用以综合反映植被覆盖的时空演变特征^[39]。利用 1982—2015 年这 34 年数据进行拟合,避免了研究结果的随机性和偶然性,其结果可反映植被的生长状况和变化趋势。计算公式为:

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

式中, θ_{slope} 为 NDVI 回归方程的斜率; n 为监测年数; $NDVI_i$ 为第 i 年的年 NDVI 均值;当 $\theta_{slope} > 0$ 时,表明 NDVI 呈增加趋势;当 $\theta_{slope} < 0$ 时,表明 NDVI 呈下降趋势。

2.3 变异分析

变异系数又称“离散系数”,可以表示植被覆盖的波动规律^[40]。研究基于每个像元 34 年的 NDVI 增值变化计算得出的,它的优点是不需要参照平均值,可以消除测量尺度和量纲的影响。其计算公式为:

$$C_v = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中, C_v 为 NDVI 变异系数; x_i 为第 i 年 NDVI 均值; $\bar{x}$ 为这些年 NDVI 平均值; C_v 值越小,表明 NDVI 波动越小;

C_v 值越大,表明 NDVI 波动越大。

2.4 突变分析

(1) 累积距平

在气象分析上,通常用累积距平曲线来判断数据长期显著的演变趋势以及持续性变化,基于它也可以诊断出发生突变的大致时间^[41]。对于时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其某一时刻 t 的累积距平值表示为:

$$\hat{x}_i = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 计算出所有时刻的累积距平值即可绘制出累积距平曲线进行趋势分析。

(2) M-K 突变检验

M-K (Mann-Kendall) 检验法是世界气象组织推荐的非参数检验方法,广泛用于时间序列要素的趋势和突变双重检测。其检验原理是构造秩序列 s_k , 针对无自相关性随机变量, 定义顺序统计量曲线 UF_k 和逆序统计量曲线 UB_k , 曲线 UF_k 超过临界线部分对应显著上升或者显著下降, 出现在临界线之间的两条曲线的交点对应突变点^[42]:

$$\begin{cases} UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \\ UB_k = -UF_k \\ E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $E(s_k)$ 和 $\text{var}(s_k)$ 分别为统计量 s_k 的均值和方差。

2.5 相关分析

(1) 相关系数: 通过逐像元计算年最大 NDVI 与年平均气温和年降水之间的相关系数, 来表示气候因子与 NDVI 变化的相关程度^[43]。相关系数计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, r_{xy} 为变量 x 与 y 的相关系数; i 为样本数; x_i, y_i 分别为第 i 年的 NDVI 和年均气温或年降水量; $\bar{x}$ 为 1982—2015 年 NDVI 平均值; $\bar{y}$ 为相应的时间段累积平均气温或年降水量。

相关系数 r_{xy} 取值范围是 $(-1 < r_{xy} < 1)$: 通常 $|r_{xy}| < 0.3$ 为不相关, $0.3 < |r_{xy}| < 0.5$ 为低度相关, $0.5 < |r_{xy}| < 0.8$ 为中度相关, $|r_{xy}| > 0.8$ 以上为高度相关, $|r_{xy}| > 0.95$ 表示两者显著性相关。

(2) 偏相关系数: 偏相关分析用于研究两个特定变量之间的相互作用关系, 即当两个变量均与第三个变量存在相关关系时, 剔除其影响, 而只分析另外两个变量之间的相关程度。偏相关计算公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (7)$$

式中, $r_{xy,z}$ 表示变量 z 固定后变量 x 和 y 的偏相关系数。

3 结果与分析

3.1 NDVI 年内、年际变化

3.1.1 NDVI 年内变化

研究区纬度跨越范围达 25° , 为便于研究植被纬向变化规律, 将研究区每隔 5° 划分为一个子区间, 分别对

应“低纬度、中低纬度、中纬度、中高纬度和高纬度”五个区域。通过 MVC 方法获取“地形过渡带”逐月最大 NDVI 值数据,采用式(1)的高斯函数拟合法对 34 年的月最大 NDVI 值进行曲线拟合,统计 1982—2015 年 5 个子区间的月最大 NDVI 值年内变化情况(图 2)。

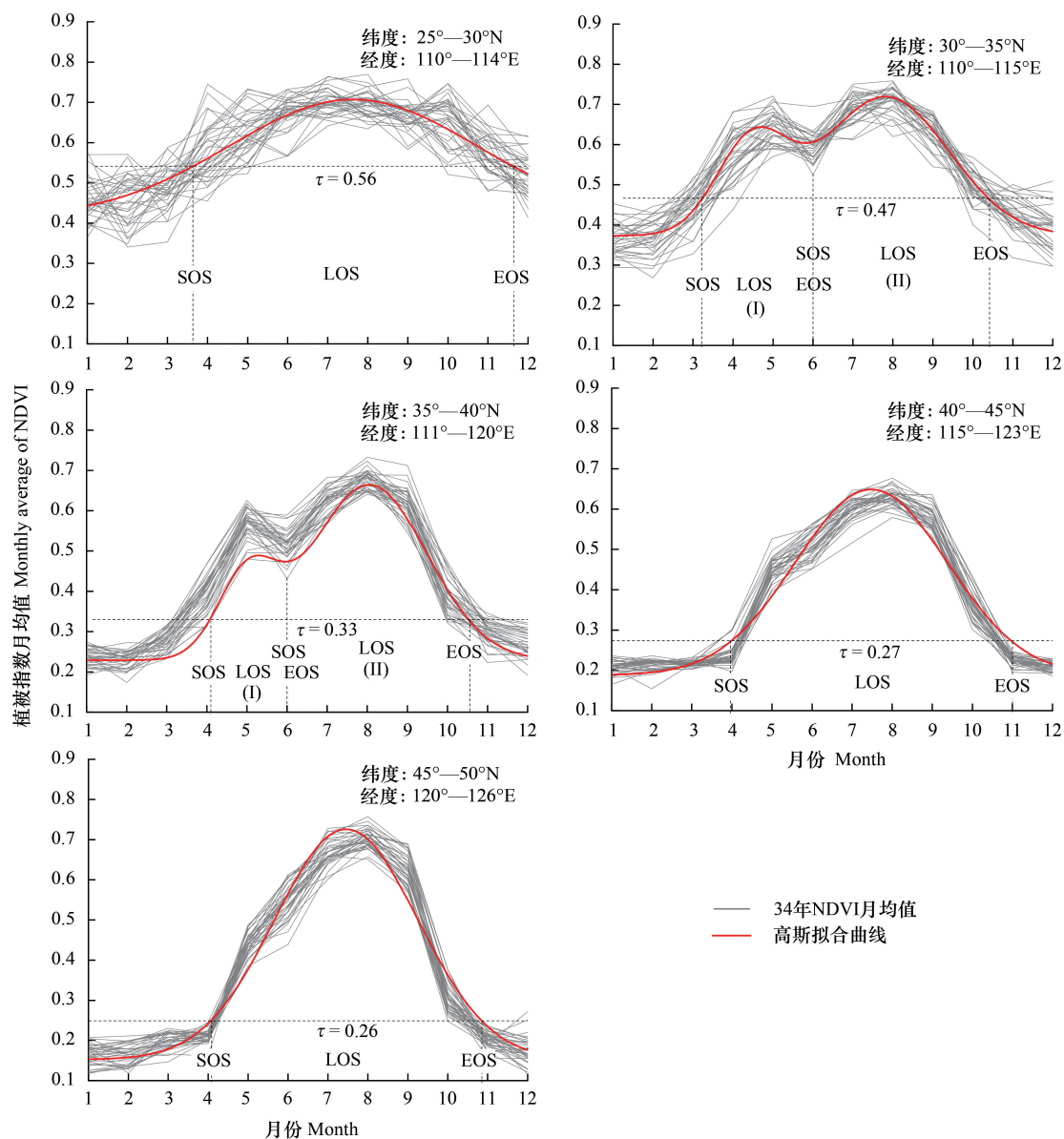


图 2 “地形过渡带”34 年月最大 NDVI 值变化趋势

Fig.2 Inner annual variation of maxNDVI in terrain transition zone

τ :生长期阈值;NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index;SOS:返青期 Start of growing season;EOS:枯黄期 End of growing season;LOS:生长期 Length of growing season;图中(I)、(II)分别对应一年的两个生长期

“地形过渡带”的 5 个子区间 34 年月最大 NDVI 值凸显了南北方植被年周期性特征。即从四季常青的低纬度地区,到一年两熟的中低纬度地区,再到一年一熟生长长期的中高纬度地区、一年一熟短生长期的低纬度地区(图 2)。

从南向北,植被的返青期始于 4 月下旬,持续到 6 月份;一年中植被生长最旺盛的时期在 7—9 月份;每年 11 月至次年 4 月高纬度地区植被长势较差。对“地形过渡带”月最大 NDVI 值进行曲线拟合,发现该地区月最大 NDVI 值符合高斯分布。根据高斯拟合曲线的拐点,可获得五个子区返青期的 NDVI 域值分别为 0.56、

0.47、0.33、0.27 和 0.26, 依此计算出各子区的生长期(表 1)。

表 1 阈值法计算得到的返青期、枯黄期和生长期

Table 1 The SOS, EOS and LOS calculated by the threshold method

地理分段 Subsection	时间点 Time	高斯拟合函数(R^2 , 拟合优度) GAUSS fit function (R^2 , goodness of fit)	返青期(x_1) SOS(x_1) 月-日 Month-day	枯黄期(x_2) EOS(x_2) 月-日 Month-day	生长期(x_2-x_1) LOS(x_2-x_1) 天数 Days
25°—30°N	1982 年	$\hat{y} = 0.4294 + 0.2175 \cdot e^{-\frac{(x-8.0771)^2}{0.0652}}, (R^2 = 0.8177)$	05-10	10-26	169 d
	2015 年	$\hat{y} = 0.4580 + 0.2894 \cdot e^{-\frac{(x-7.2317)^2}{0.0581}}, (R^2 = 0.6100)$	04-09	10-05	179 d
	34 年平均	$\hat{y} = 0.4139 + 0.2932 \cdot e^{-\frac{(x-7.6351)^2}{0.0523}}, (R^2 = 0.9686)$	04-16	10-23	190 d
30°—35°N	1982 年	$\hat{y} = 0.3400 + 0.2107 \cdot e^{-\frac{(x-4.4763)^2}{0.5744}} + 0.4136 \cdot e^{-\frac{(x-7.8590)^2}{0.2250}}, (R^2 = 0.9704)$	I : 03-17 II : 06-11	I : 05-13 II : 09-10	148 d
	2015 年	$\hat{y} = 0.4025 + 0.2588 \cdot e^{-\frac{(x-4.4659)^2}{0.8357}} + 0.3506 \cdot e^{-\frac{(x-7.6122)^2}{0.2267}}, (R^2 = 0.9587)$	I : 03-21 II : 06-04	I : 05-27 II : 09-03	158 d
	34 年平均	$\hat{y} = 0.3730 + 0.2274 \cdot e^{-\frac{(x-4.4733)^2}{0.6213}} + 0.3461 \cdot e^{-\frac{(x-7.8160)^2}{0.1984}}, (R^2 = 0.9882)$	I : 03-18 II : 06-07	I : 05-06 II : 08-30	151 d
35°—40°N	1982 年	$\hat{y} = 0.2290 + 0.2017 \cdot e^{-\frac{(x-5.0140)^2}{0.9009}} + 0.4353 \cdot e^{-\frac{(x-8.0447)^2}{0.2380}}, (R^2 = 0.9548)$	I : 04-08 II : 06-18	I : 05-24 II : 09-16	136 d
	2015 年	$\hat{y} = 0.2353 + 0.3549 \cdot e^{-\frac{(x-4.9048)^2}{0.4712}} + 0.4504 \cdot e^{-\frac{(x-8.3245)^2}{0.2897}}, (R^2 = 0.9663)$	I : 03-27 II : 07-01	I : 05-29 II : 09-19	143 d
	34 年平均	$\hat{y} = 0.2454 + 0.2731 \cdot e^{-\frac{(x-4.8900)^2}{0.8021}} + 0.4522 \cdot e^{-\frac{(x-7.9723)^2}{0.2463}}, (R^2 = 0.9806)$	I : 04-03 II : 06-16	I : 05-21 II : 09-12	136 d
40°—45°N	1982 年	$\hat{y} = 0.1851 + 0.4400 \cdot e^{-\frac{(x-7.4900)^2}{0.1454}}, (R^2 = 0.9548)$	5-19	09-10	114 d
	2015 年	$\hat{y} = 0.1714 + 0.4908 \cdot e^{-\frac{(x-7.2908)^2}{0.1105}}, (R^2 = 0.9333)$	05-05	09-13	131 d
	34 年平均	$\hat{y} = 0.1878 + 0.4609 \cdot e^{-\frac{(x-7.4786)^2}{0.1384}}, (R^2 = 0.9461)$	05-18	09-11	116 d
45°—50°N	1982 年	$\hat{y} = 0.1820 + 0.4982 \cdot e^{-\frac{(x-7.3415)^2}{0.1621}}, (R^2 = 0.9071)$	05-18	09-03	108 d
	2015 年	$\hat{y} = 0.1369 + 0.6212 \cdot e^{-\frac{(x-7.5013)^2}{0.1387}}, (R^2 = 0.9501)$	05-19	09-12	116 d
	34 年平均	$\hat{y} = 0.1522 + 0.5738 \cdot e^{-\frac{(x-7.4574)^2}{0.1546}}, (R^2 = 0.9527)$	05-20	09-08	111 d

SOS:返青期 Start of growing season;EOS:枯黄期 End of growing season;LOS:生长期 Length of growing season;表中 I、II 分别对应一年的两个生长期

从表 1 中可见,由于返青期(SOS)提前,枯黄期(EOS)滞后,五个子区从南到北,34 年生长期(LOS)分别增长了 10 d、10 d、7 d、17 d 和 8 d。由于气候影响,植被平均生长期介于 190 d(南)到 111 d(北)。整个 25°纬度变化,导致 LOS 缩短 79 d,相当于纬度每增高 1°,植被生长期缩短 3.16 d。

3.1.2 NDVI 年际变化

研究将月合成的 816 期月最大 NDVI 值数据进行 MVC 处理,可进一步得到研究区 34 年年最大 NDVI 值变化趋势(图 3)。对 5 个子区间的年最大 NDVI 区域均值进行一元线性回归分析,可获得 34 年研究区植被覆盖变化的趋势。

如图 3 所示,“地形过渡带”的 5 个子区间 34 年年最大 NDVI 值均呈现上升趋势,由低纬度到高纬度,其线性拟合的斜率分别为 0.00152(相关系数 $r = 0.657$)、0.00089($r = 0.442$)、0.00088($r = 0.444$)、0.00108($r =$

0.575) 和 0.00112 ($r=0.514$), 表明全域植被向好。研究区的 5 个子区间随着纬度增加, 年最大 NDVI 值变低, 但由于覆盖类型不同, 45—50°N 子区的年最大 NDVI 值高于 40—45°N 子区。

3.1.3 NDVI 体积变化

年内植被指数的面积积分常用于估算总初级生产力 (GPP) 和净初级生产力 (NPP) [44—45]。基于此, 时间序列 NDVI 体积积分则可以表达“地形过渡带”生物总量的变化及物候的变迁。研究以月合成最大 NDVI 值为横轴, 以 1982—2015 年度为纵轴获得五个子区的立体正交视图 (图 4)。

由图 4 可知: (1) 该 NDVI 立体正交视图可以直观确认植被返青期、枯黄期的阈值 (见图中红线), 但精度低于 3.1.1 节的拐点计算法。(2) 年内面积积分增大, 导致时间序列总体积增大。分别采用梯形规则、辛普森规则和辛普森 3/8 规则三种算法计算体积并取均值, 五个子区 NDVI 体积生物量分别为 217.84、197.67、160.13、139.82 和 139.84 (无量纲), 其归一化体积生物量比值分别为 1.55:1.41:1.15:1:1。(3) 另外发现, 在 25—30°N 地区物候特征呈现出由一年两熟过渡到一年三熟; 在 30—35°N 地区物候特征呈现出由一年一熟过渡到一年两熟; 在 35—40°N 地区物候特征呈现出由一年一熟春季有小肩峰过渡到一年两熟; 在 40—45°N 和 45—50°N 地区物候特征稳定, 始终为一年一熟。

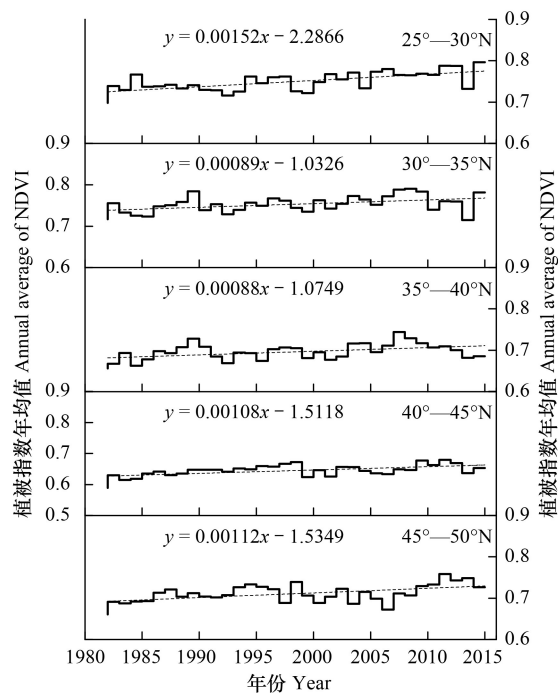


图 3 过渡带 34 年 NDVI 均值年际时序变化

Fig.3 Interannual variation of maxNDVI in terrain transition zone

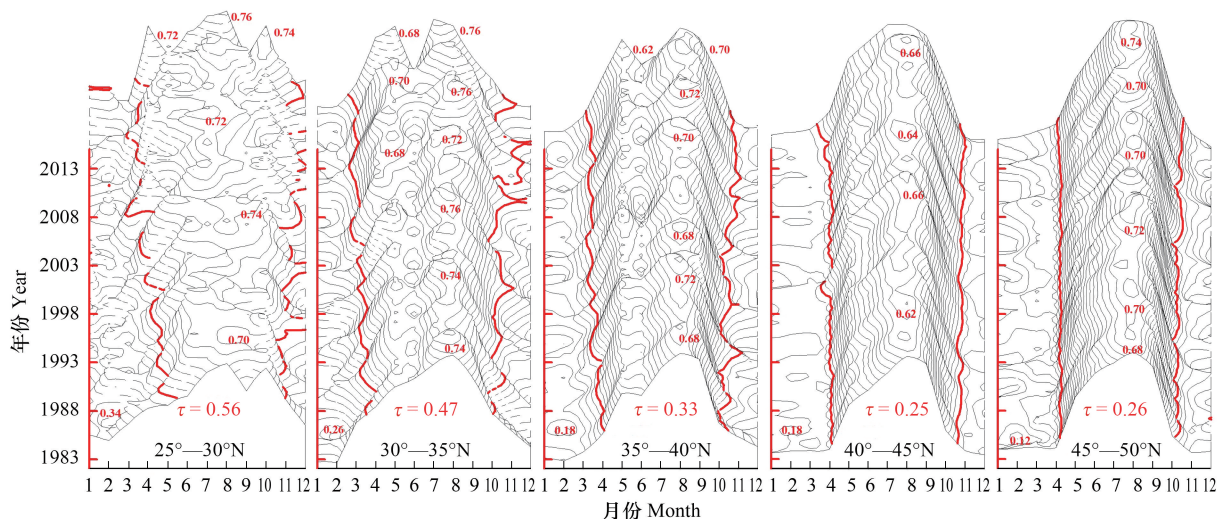


图 4 “地形过渡带”5 个子区时序 NDVI 立体正交视图

Fig.4 Time series NDVI stereo orthographic map of sub-regions in the transition zone

3.2 NDVI 趋势及变异分析

3.2.1 趋势分析

根据式 (2), 对年 NDVI 最大值进行逐像元做线性回归分析, 获得逐像元回归曲线斜率 θ_{slope} 图像 (图 5)。

参照已有的研究,将 θ_{slope} 研究区中的 NDVI 变化分为 5 个等级,即严重退化 ($\theta_{\text{slope}} \leq -0.002$)、轻微退化 ($-0.002 < \theta_{\text{slope}} \leq -0.0007$)、基本不变 ($-0.0007 < \theta_{\text{slope}} \leq 0.0007$)、轻微改善 ($0.0007 < \theta_{\text{slope}} \leq 0.002$) 和明显改善 ($0.002 < \theta_{\text{slope}}$)^[46]。

由图 5 分析可得:34 年间年最大 NDVI 值呈增长趋势的有 29.76 万 km^2 ,占研究区面积的 58.84%;呈基本不变趋势的有 14.71 万 km^2 ,占研究区面积的 29.09%;呈减少趋势的有 6.10 万 km^2 ,占研究区面积的 12.07%。

研究区改善最为明显的区域为湘鄂边界、太行山东麓的河北省、辽西、大兴安岭等地区,天津市、河南北部、内蒙古东部的部分区域(科尔沁沙地)呈现严重退化的情况。年最大 NDVI 值年际变化呈增长趋势的面积大约是呈减少区域面积的 4.87 倍;NDVI 年际变化呈增长的趋势基本覆盖了整条过渡带,其中年际变化趋势基本不变的区域夹杂在增长区域之中。

3.2.2 变异分析

根据式(3),逐像元计算 1982—2015 年研究区 NDVI 变异系数 C_v ,研究区的变异系数如(图 6)。根据 C_v 的大小将其分为 5 个等级:即低波动变化 ($C_v \leq 0.05$)、相对较低波动变化 ($0.05 < C_v \leq 0.10$)、中等波动变化 ($0.10 < C_v \leq 0.15$)、相对较高波动变化 ($0.15 < C_v \leq 0.20$) 和高波动变化 ($0.20 < C_v$)^[47]。

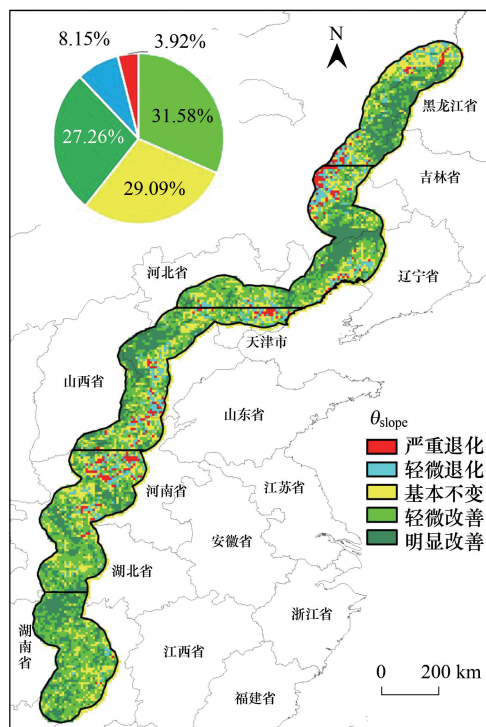


图 5 过渡带 34 年年最大 NDVI 值斜率变化

Fig.5 Slope variation of maxNDVI in terrain transition zone

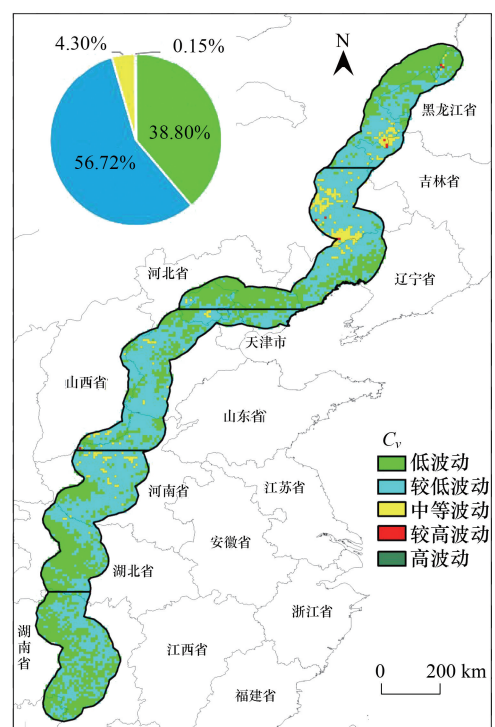


图 6 过渡带 34 年年最大 NDVI 值变异系数

Fig.6 Coefficient of variation of maxNDVI in terrain transition zone

由图 6 可以看出,变异系数 C_v 反映的 34 年年最大 NDVI 值波动规律是:较低波动变化占比最高,面积占比达 56.72%,低波动变化次之,面积占比达 38.80%。低波动变化的区域主要分布在研究区的湘鄂山区、北京以北的燕山山脉和东北部的大兴安岭地区;较低波动变化的区域主要分布在研究区中部的河南、河北两省;中等波动变化主要是辽西地区、内蒙古的科尔沁沙地区域;较高波动变化发生在吉林的白城市。但变异系数 C_v 只表达波动程度,对比斜率变化图像,可知中等波动地区和较高波动的白城市的绿色变化都是正向的。

3.2.3 地形分析

地形过渡带的是地形变化剧烈区域,研究以 5° 间隔沿纬度设置了地形及 NDVI 剖面,进一步分析了地形

变化对 NDVI 的影响(图 7)。通过沿纬向的剖面分析,发现地形过渡带的地形变化显著影响 NDVI 的空间分布,海拔与 NDVI 呈正相关。即高海拔地带分布有高值 NDVI,低海拔地带分布着低值 NDVI,这种地带性分布规律在中低纬度地区非常显著($P < 0.01$,图 7),在中高纬度地区显著($P < 0.01-0.05$,图 7)。说明 NDVI 在地形过渡带山地效应明显,山区植被具有明显地带性分布规律。另外在山前地形变化剧烈区域,出现明显边缘效应,即山地-平原结合部位,存在 NDVI 显著下降的区段,这一区段不是人类居住区,却往往是人-地矛盾最为突出的过渡地带。

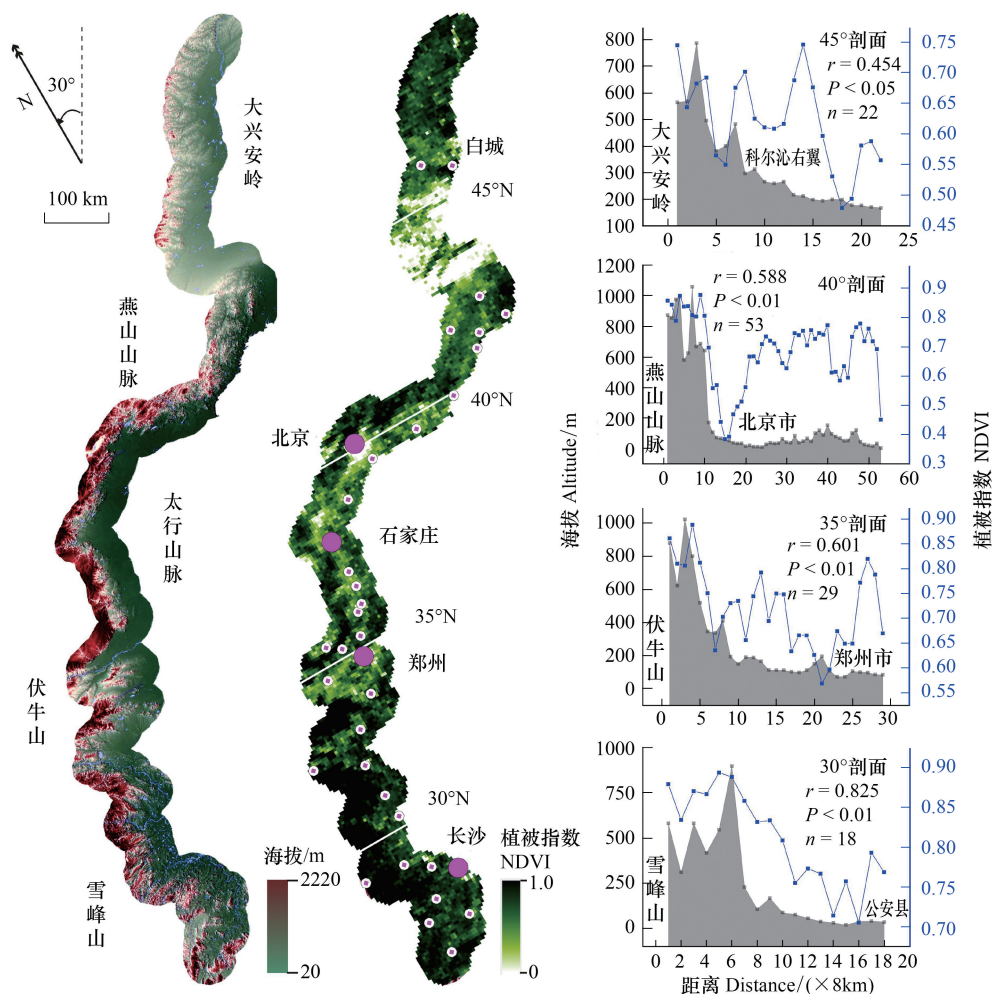


图 7 地形变化对 NDVI 空间分布的影响

Fig.7 The effect of topographic changes on the spatial distribution of NDVI

3.3 气候变化与突变检验

3.3.1 时序分析

在全球变化的背景下,陆地与气候之间的相互作用,通过降水机制改变和气温变化等对植物的生长以及分布产生了重要的影响^[48]。图 8 分别展示了“地形过渡带”五个子区间 1982—2016 年平均气温和年降水的变化趋势。

(1)受纬度影响,近 34 年“地形过渡带”各区间年均气温差异明显,随着纬度的升高,年均气温逐渐降低(图 8)。纬度由低到高各区间的年均气温范围为:16.69—18.44 °C、14.45—16.17 °C、11.73—13.18 °C、5.89—9.56 °C 和 3.21—5.58 °C。过渡带纬度由低到高的各区间年均气温变率为-3.37 °C/5°N。“地形过渡带”34 年年均最低气温为 2.45 °C (45°—50°N, 1987 年),最高气温为 18.44 °C (25°—30°N, 2013 年)。25°—30°N 区间

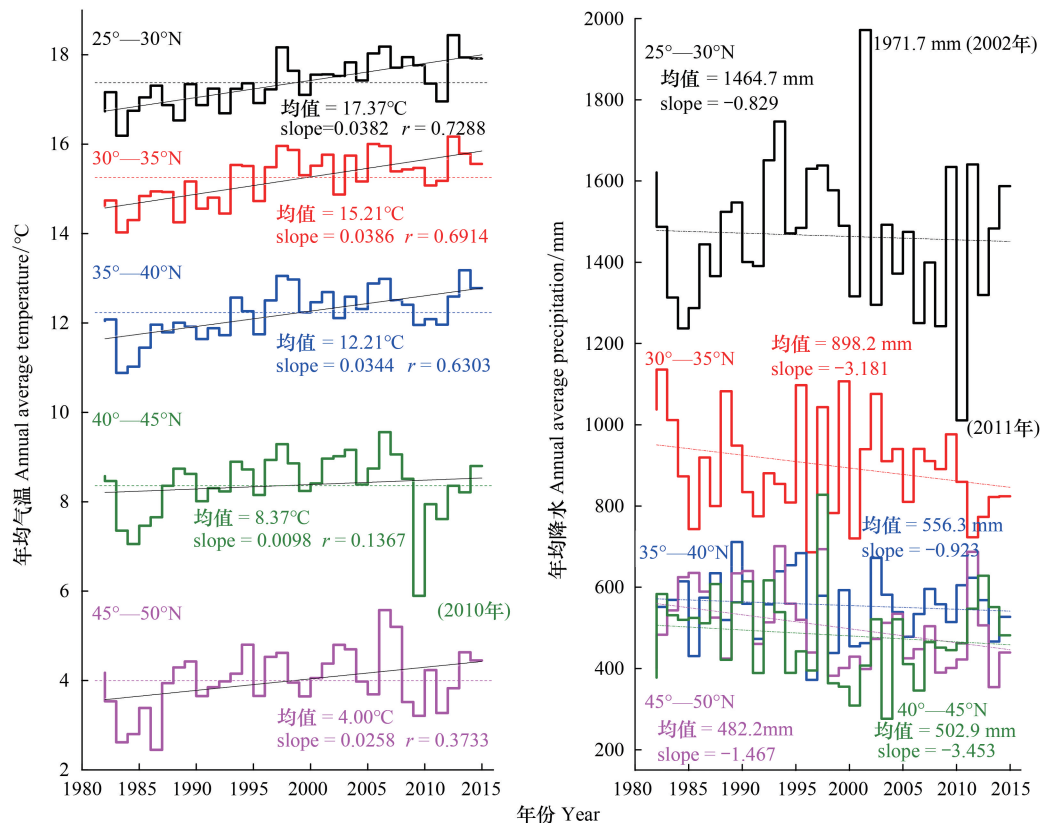


图8 区域年均气温及年降水的变化趋势

Fig.8 Variation of temperature and precipitation in terrain transition zone

气温增长速率为 $0.382\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $30^{\circ}\text{—}35^{\circ}\text{N}$ 区间气温增长速率为 $0.386\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $35^{\circ}\text{—}40^{\circ}\text{N}$ 区间气温增长速率为 $0.344\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $40^{\circ}\text{—}45^{\circ}\text{N}$ 区间气温增长速率为 $0.098\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $45^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{N}$ 区间气温增长速率为 $0.258\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

(2) 近 34 年“地形过渡带”各区间年降水呈明显减少趋势,受纬度影响,各区间降水量存在较大差异(图 8)。 $25^{\circ}\text{—}35^{\circ}\text{N}$ 范围内,降水量随着纬度的升高而降低, $35^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{N}$ 范围内降水量受纬度影响变小。“地形过渡带” $25^{\circ}\text{—}35^{\circ}\text{N}$ 降水量变率为 $-556.54\text{ mm}/5^{\circ}\text{N}$ 。 $35^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{N}$ 降水量变率为 $-37.03\text{ mm}/5^{\circ}\text{N}$ 。纬度由低到高各区间的降水量范围为: $1010.89\text{—}1971.71\text{ mm}$ 、 $685.92\text{—}1135.97\text{ mm}$ 、 $372.09\text{—}711.33\text{ mm}$ 、 $354.07\text{—}701.01\text{ mm}$ 、 $276.39\text{—}827.80\text{ mm}$ 。“地形过渡带”34 年最低年降水为 276.39 mm ($45^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{N}$, 2004 年),最高降水为 1971.71 mm ($25^{\circ}\text{—}30^{\circ}\text{N}$, 2002 年)。 $25^{\circ}\text{—}30^{\circ}\text{N}$ 区间降水变化速率为 $-8.292\text{ mm}/10\text{a}$, $30^{\circ}\text{—}35^{\circ}\text{N}$ 区间降水变化速率为 $-31.816\text{ mm}/10\text{a}$, $35^{\circ}\text{—}40^{\circ}\text{N}$ 区间降水变化速率为 $-9.236\text{ mm}/10\text{a}$, $40^{\circ}\text{—}45^{\circ}\text{N}$ 区间降水变化速率为 $-34.534\text{ mm}/10\text{a}$, $45^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{N}$ 区间降水变化速率为 $-14.67\text{ mm}/10\text{a}$ 。

3.3.2 突变分析

(1) 累积距平分析

如果说时序分析可以表达物理量的变化速率,则距平分析更侧重于表达物理量的变化幅度。根据式(4),依次获得各子区的 NDVI、平均气温和年降水累积距平曲线(图 9)。

如图 9 所示,距平分析显示了变化的阶段性规律,NDVI 累积变化规律大致与气温相同、与降水相反。具体表现为:① NDVI 虽总体呈上升趋势,但在低纬度区累积距平呈“V”字形变化,前半段增幅较小,后半段增幅较大,拐点出现在 2001 年;中低纬度和中纬度区累积距平呈“U”字形变化,拐点不明显,大致出现在 1987 和 2003 年;中高纬度和高纬度区累积距平呈“W”字形变化,拐点出现在 1992 和 2008 年。② 气温累积变化

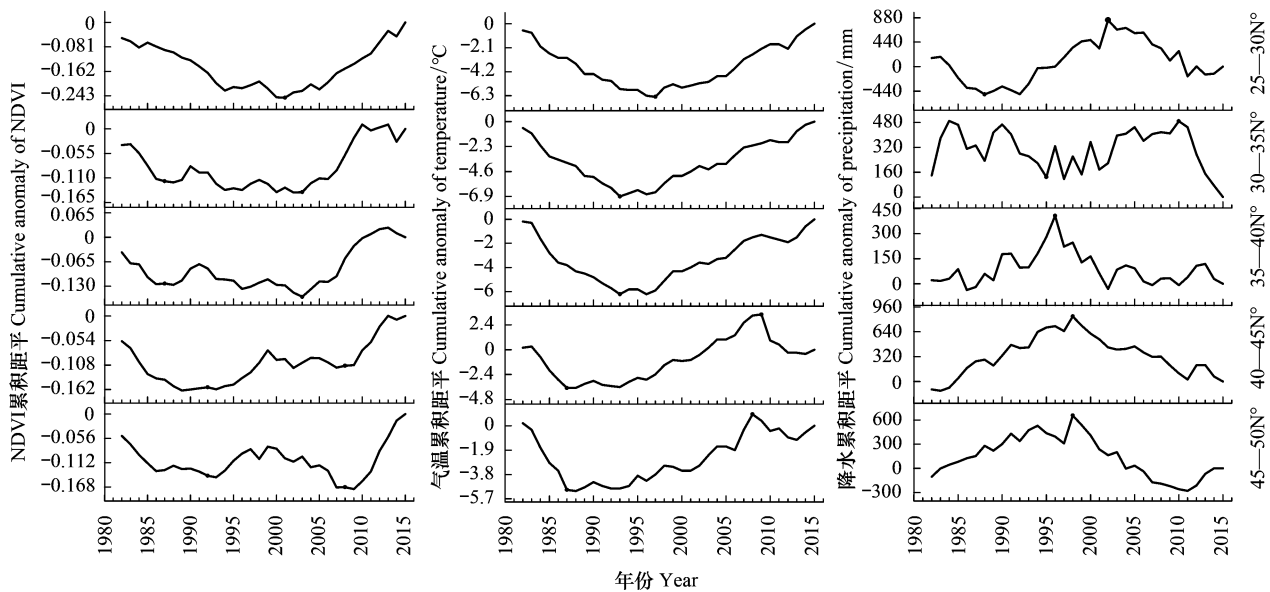


图9 区域NDVI、气温和降水的累积距平曲线

Fig.9 Cumulative anomaly curves of sub-regional NDVI, temperature and precipitation

规律大致与NDVI相同,气温升高的幅度呈阶段性变化。③年降水虽总体下降,但累积变化呈阶段性。表现为在低纬度区累积距平呈“倒N”字形变化,前1/3段小幅下降,中1/3段大幅增高,后1/3段大幅下降,尾部降幅有所减小,三段拐点分别出现在1990、2003和2011年;中低纬度区累积距平呈“倒U”字形变化,两肩部的拐点不明显,大致出现在1985和2010年;中纬度、中高纬度和高纬度区累积距平均呈“倒V”字形变化,拐点分别出现在1996或1997年。

(2) M-K 突变检验

如前所述,时序分析和距平分析的拐点是 inconsistent 的,曲线直观判断法虽然原理浅显易懂、操作简单,仅可用于序列初步诊断,且无法提供物理量突变的显著性检验,拐点是否是突变点,尚需深入分析。在此引入M-K检验方法,根据式(5)进行时间序列要素的趋势和突变双重检测(图10)。

分析图10可知:①NDVI在中低纬度有两个突变点(1989、2008年);在中纬度区有四个突变点(1986、1992、2005、2011年),仅中纬度区1992年和2005年通过了0.05可靠性检验。②气温在中低纬度区有一个突变点(1998年);在中纬度区有两个突变点(1996、2000年);在中高纬度区有两个突变点(1989、2008年);在高纬度区有两个突变点(1989、2012年);但所有突变点均没有通过0.05可靠性检验。③年降水在低纬度区有两个突变点(1985、2012年);在中低纬度区有四个突变点(1983、1986、2005、2011、2014年);在中纬度区有四个突变点(1991、1992、2005、2006年);在中高纬度区有两个突变点(1997、2000年);在高纬度区有两个突变点(1986、2011年);但所有突变点均没有通过0.05可靠性检验。

3.3.3 相关分析

(1) 相关系数

根据式(6),对“地形过渡带”的NDVI与温度、降水做相关性分析,获得逐像元1982—2015年NDVI最大值与年均气温和年总降水的相关系数图(图11)。

由图11可知,年最大NDVI与气温成显著正相关的区域主要分布在研究区的南部,北部相关性不显著。年最大NDVI与年降水成显著正相关的区域主要分布在研究区的北部,南部相关性不显著。这是因为“地形过渡带”的南部地区属于亚热带季风气候而且是湿润区,它的典型植被是常绿阔叶林;北部属于温带季风气候而且部分是半湿润区,部分是半干旱区,它的典型植被是温带落叶阔叶林以及温带落叶灌丛。从中国东部

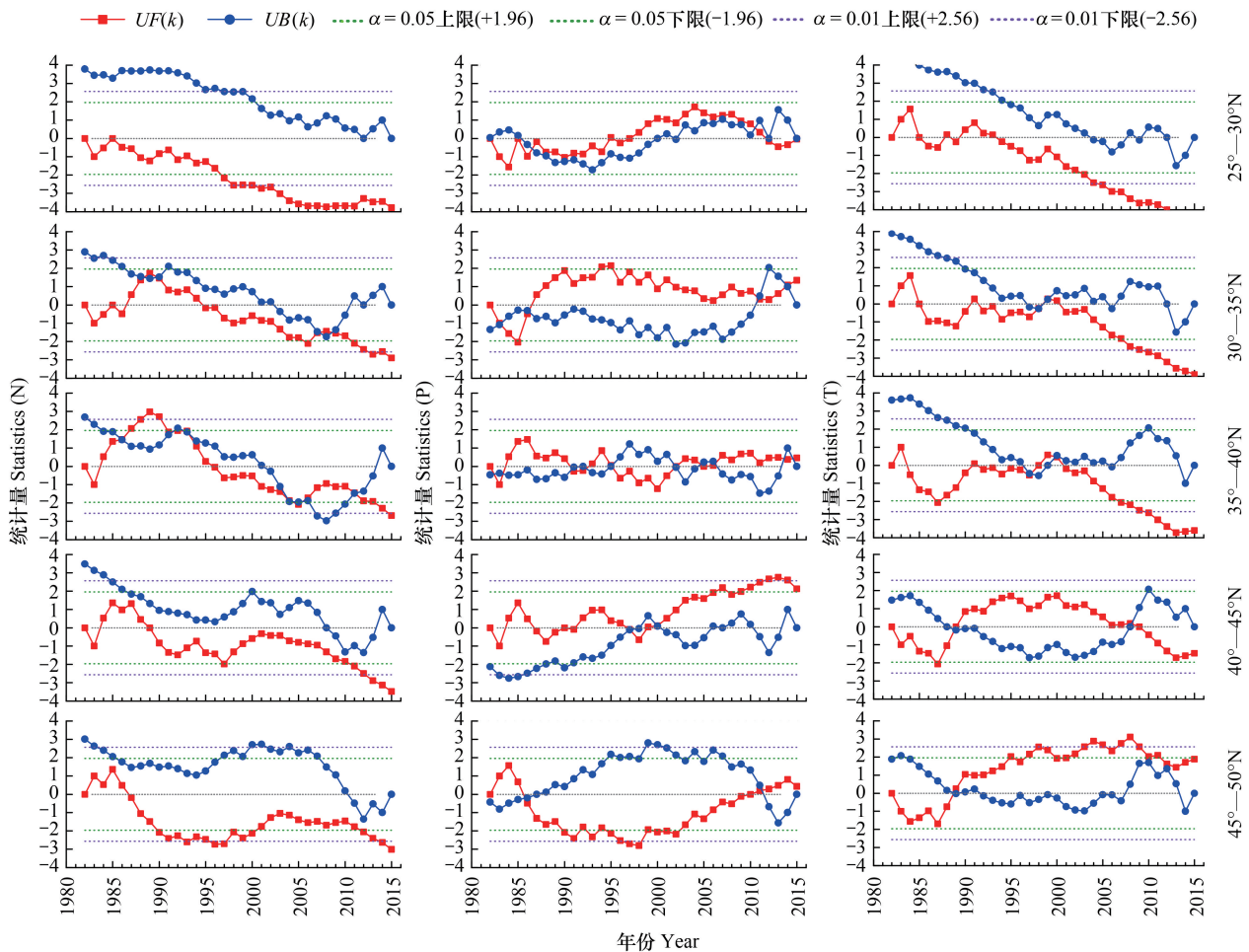


图 10 过渡带 NDVI、气温和降水的 M-K 突变检验

Fig.10 M-K test of NDVI, temperature and precipitation in terrain transition zone

UF:顺序统计量 Order statistics; UB:逆序统计量 Reverse statistics; N:植被指数 Normalized difference vegetation index; T:气温 Temperature; P:降水 Precipitation

南北样带 (NSTEC) 研究中知,随着温度升高,植被 NDVI 对温度的敏感性有所降低,但总体而言都比较高^[49]。随着降水增加,植被 NDVI 对降水的敏感性显著降低,相关性从 0.8 (温带落叶灌丛) 降低到 0.1 (亚热带常绿阔叶林) 以下。对自然植物而言,分布在降水比较充沛区域的植被,其 NDVI 主要受温度控制;对于降水比较缺乏的区域,植被 NDVI 同时受控于温度和降水两个因子,这与本文的结论是基本一致的。其中,按比例及面积统计,年最大 NDVI 均值与年均气温和年降水的相关性如表 2。

(2) 偏相关系数

据式(7),进一步对年最大 NDVI 与年均气温和年降水量进行偏相关分析,获得其偏相关系数图(图 12)。

在偏相关性图中,年最大 NDVI 和气温呈正相关区域占研究区的 65.61%,年最大 NDVI 和降水呈正相关占研究区的 59.87%。

4 结论

(1) 过渡带 NDVI 月度变化规律:从低纬度地区的单峰曲线,到中纬度地区的双峰曲线,再到高纬度地区的单峰曲线,反映出从四季长青的低纬度地区,到一年两熟的中纬度地区,再到一年一熟长生长期、一年一熟短生长期的低纬度地区的植被生命周期特征。

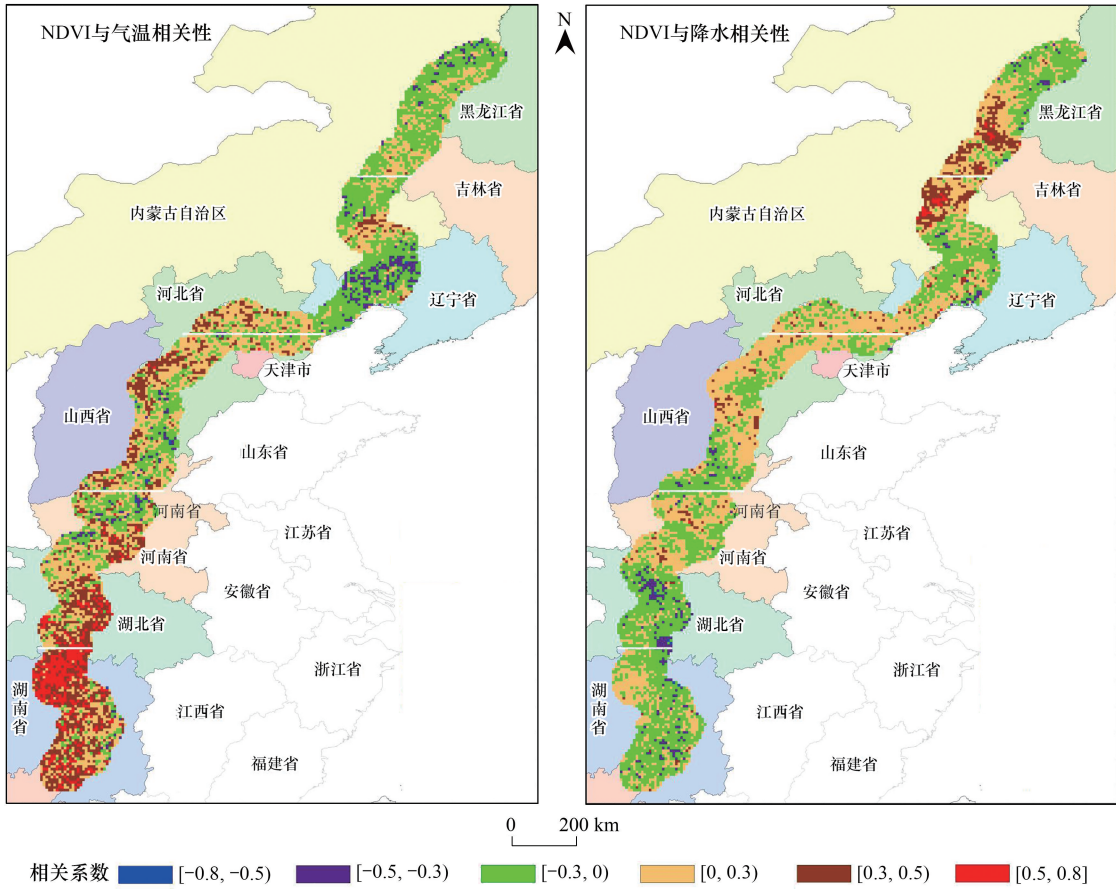


图 11 研究区 1982—2015 年 NDVI 最大值与气候因子相关性图像

Fig.11 The correlation coefficient between maxNDVI and climate factors from 1982 to 2015

表 2 研究区 NDVI 与气候因子的相关性统计表

Table 2 Correlation statistics between NDVI and climatic factors in the study area

相关程度 Correlation	相关系数区间 Correlation coefficient interval	NDVI 与年均气温 NDVI & annual average temperature		NDVI 与年降水 NDVI & annual precipitation	
		研究区比例 Proportion of study area/%	研究区面积 Area of study area/km ²	研究区比例 Proportion of study area/%	研究区面积 Area of study area/km ²
中度负相关 Moderate negative correlation	[-0.8, -0.5)	0.16	826.41	0.08	413.14
低度负相关 Low negative correlation	[-0.5, -0.3)	4.72	23896.99	3.74	18935.96
弱负相关 Weak negative correlation	[-0.3, 0.0)	32.89	166383.66	42.47	214837.08
弱正相关 Weak positive correlation	[0.0, 0.3)	37.54	189936.32	45.90	232189.30
低度正相关 Low positive correlation	[0.3, 0.5)	18.55	93797.41	7.28	36839.05
中度正相关 Moderate positive correlation	[0.5, 0.8)	6.14	31059.20	0.53	2685.46
总计	—	100	505900.00	100.00	505900.00

(2) 过渡带 NDVI 年际变化规律:1982—2015 年研究区年 NDVI 最大值在 34 年间整体呈现增长趋势,但是有波动变化。在研究区范围中,随着纬度增加,年 NDVI 均值变低。

(3) 过渡带 NDVI 趋势分析表明:研究区 NDVI 改善面积远大于退化面积,总体上呈缓慢改善趋势,其中研究区 NDVI 呈改善趋势的面积为 58.84%,呈退化趋势的面积为 12.07%,29.09%的面积基本不变。

(4) 过渡带 NDVI 变异系数分析:34 年间研究区 NDVI 相对较低波动和低波动变化一共占研究区的 95.52%。“地形过渡带”的年 NDVI 受到各种因素的影响呈整体改善。

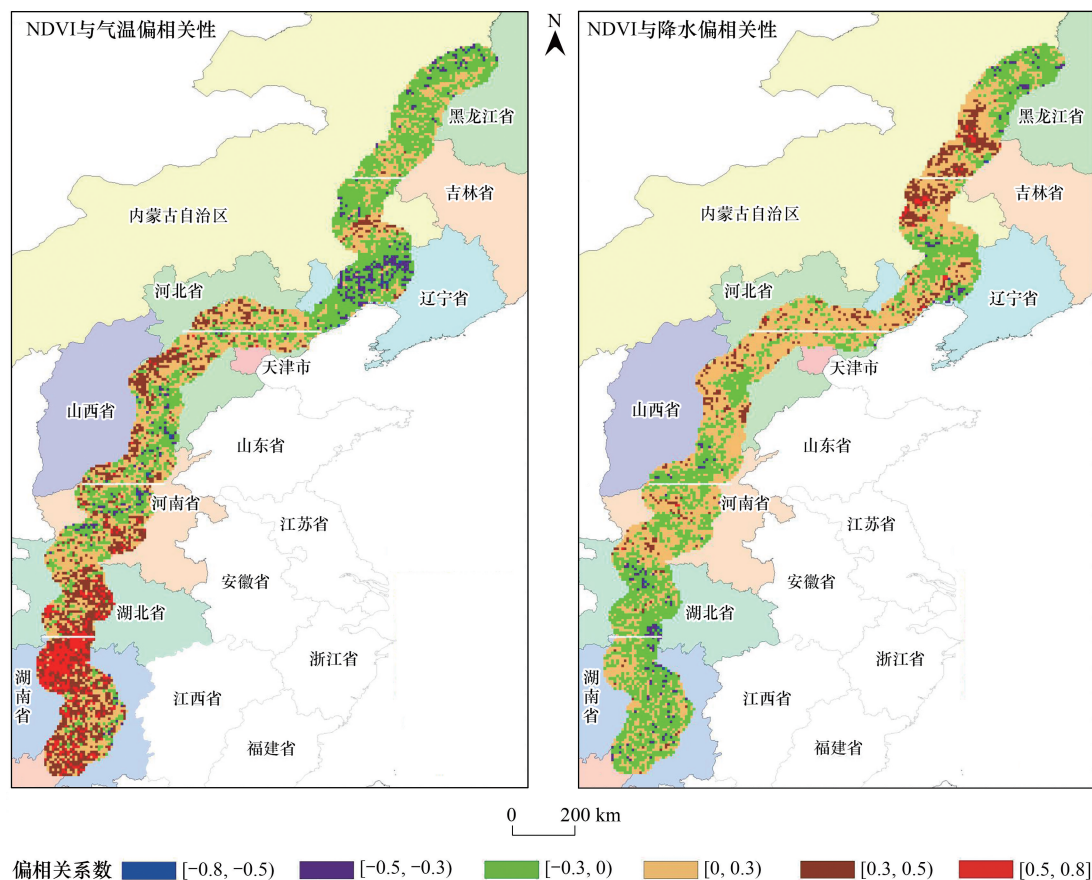


图 12 研究区 1982—2015 年最大 NDVI 与气候因子偏相关性

Fig.12 The partial correlation coefficient between maxNDVI and climate factors from 1982 to 2015

(5) 过渡带 NDVI 与地形相关性:地形变化显著影响 NDVI 的空间分布,NDVI 在地形过渡带山地效应明显,海拔与 NDVI 呈正相关关系。在山地-平原结合部位,人-地矛盾导致 NDVI 显著降低,呈现明显边缘效应。

(6) 过渡带 NDVI 与气候相关性:低纬度地区 NDVI 与温度呈现中等正相关,但是随着纬度的增加,相关程度逐渐降低;NDVI 与年降水呈现弱相关。相关系数表明区域温度对植被的影响大于降水对植被的影响;偏相关系数同样表明,NDVI 与年均气温的相关程度要高于年降水。

参考文献 (References):

- [1] Chen M, Lv G N, Zhou C H, Lin H, Ma Z Y, Yue S H, Wen Y N, Zhang F Y, Wang J, Zhu Z Y, Xu K, He Y Q. Geographic modeling and simulation systems for geographic research in the new era: some thoughts on their development and construction. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(8): 1207-1223.
- [2] 陈发虎,傅伯杰,夏军,吴铎,吴绍洪,张懿铨,孙航,刘禹,方小敏,秦伯强,李新,张廷军,刘宝元,董治宝,侯书贵,田立德,徐柏青,董广辉,郑景云,杨威,王鑫,李再军,王飞,胡振波,王杰,刘建宝,陈建徽,黄伟,侯居峙,蔡秋芳,隆浩,姜明,胡亚鲜,冯晓明,莫兴国,杨晓燕,张东菊,王秀红,尹云鹤,刘晓晨. 近 70 年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(11): 1659-1696.
- [3] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 305-311.
- [4] 但俊,阴劼. 流动人口迁移距离与其城镇化影响的区域差异. *北京大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(3): 487-496.
- [5] Cheng Y, Liu H Y, Dong Z B, Duan K Q, Wang H Y, Han Y. East Asian summer monsoon and topography co-determine the Holocene migration of forest-steppe ecotone in Northern China. *Global and Planetary Change*, 2020, 187: 103135.
- [6] Cao Q, Wu J G, Yu D Y, Wang R Q, Qiao J M. Regional landscape futures to moderate projected climate change: a case study in the agro-pastoral

- transitional zone of North China. *Regional Environmental Change*, 2020, 20(2): 66.
- [7] 廉毅, 沈柏竹, 高枏亭, 隋波. 中国气候过渡带干旱化发展趋势与东亚夏季风、极涡活动相关研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 740-749.
- [8] Ma T S, Deng X W, Chen L, Xiang W H. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification. *Science of the Total Environment*, 2020, 736: 139667.
- [9] Ma L. Study on the Structure and Form of the Shaman Dance in the Fishing and Hunting Nationalities////Proceedings of the 2nd International Seminar on Education Research and Social Science (ISERSS 2019). France: Atlantis Press, 2019, 322: 516-520.
- [10] 王星光, 李秋芳. 太行山地区与粟作农业的起源. *中国农史*, 2002, 21(1): 27-36.
- [11] 袁靖, 潘艳, 董宁宁, 司徒克. 良渚文化的生业经济与社会兴衰. *考古*, 2020(2): 83-92.
- [12] Wang S J, Chen M K, Cao R, Cao Q B, Zuo Q Q, Wang P, Yang B, Zhao S. Contribution of plant litter and soil variables to organic carbon pools following tropical forest development after slash-and-burn agriculture. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(9): 1071-1077.
- [13] 白廷彩. 豫西地区三线建设的居住形态研究. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [14] 周扬, 郭远智, 刘彦随. 中国县域贫困综合测度及 2020 年后减贫瞄准. *地理学报*, 2018, 73(8): 1478-1493.
- [15] 周蕾, 熊礼阳, 王一晴, 周秀慧, 杨莉. 中国贫困县空间格局与地形的空间耦合关系. *经济地理*, 2017, 37(10): 157-166.
- [16] 王楠, 程维明, 张一驰, 刘东成. 全国山洪灾害防治县房屋损毁风险评估及原因探究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1575-1583.
- [17] 陈述彭, 邵宇宾. 全球变化研究与地理信息系统. *地理学报*, 1996, 51(S1): 15-25.
- [18] Dannenberg M P, Song C, Hwang T, Wise E K. Empirical evidence of El Niño-Southern Oscillation influence on land surface phenology and productivity in the western United States. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 167-180.
- [19] Militino A F, Ugarte M D, Pérez-Goya U. Stochastic spatio-temporal models for analysing NDVI distribution of GIMMS NDVI3g images. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 76.
- [20] Julien Y, Sobrino J A. The Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method: an analysis of global vegetation from NDVI and LST parameters. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 329-334.
- [21] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 131-147.
- [22] de Jong R, de Bruin S, de Wit A, Schaepman M E, Dent D L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 692-702.
- [23] Kong D D, Zhang Q, Singh V P, Shi P J. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982—2013). *Global and Planetary Change*, 2017, 148: 1-8.
- [24] Lamchin M, Lee W K, Jeon S W, Wang S W, Lim C H, Song C, Sung M. Long-term trend of and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data. *MethodsX*, 2018, 5: 803-807.
- [25] 何航, 张勃, 侯启, 李帅, 马彬, 马尚谦. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [26] 王茜, 陈莹, 阮玺睿, 李小冬, 王小利, 史健宗, 王志伟. 1982—2012 年中国 NDVI 变化及其与气候因子的关系. *草地学报*, 2017, 25(4): 691-700.
- [27] Zhang Q, Kong D D, Shi P J, Singh V P, Sun P. Vegetation phenology on the Qinghai-Tibetan Plateau and its response to climate change (1982-2013). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 408-417.
- [28] Du J Q, Shu J M, Yin J Q, Yuan X J, Jiaerheng A, Xiong S S, He P, Liu W L. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 38: 216-228.
- [29] 韩瑞梅, 刘培, 马超, 马超然. 鄂尔多斯植被的 NDVI3g 动态及气候响应. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 28-33, 39.
- [30] 陈登魁, 马超, 王夏冰, 刘畅. 1982—2015 年可可西里 NDVI 变化特征及其气候响应. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1410-1417.
- [31] Zhao J J, Wang Y Q, Hashimoto H, Melton F S, Hiatt S H, Zhang H Y, Nemani R R. The variation of land surface phenology from 1982 to 2006 along the Appalachian trail. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 2087-2095.
- [32] 宋乃平, 卞莹莹, 王磊, 陈林, 杨新国, 王昀, 王兴, 曲文杰. 农牧交错带农牧复合系统的可持续机制. *生态学报*, 2020, 40(21): 7931-7940.
- [33] 王强, 张勃, 戴声佩, 邹悦, 马中华, 张亚宁. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化. *资源科学*, 2011, 33(8): 1613-1620.
- [34] Butt B, Turner M D, Singh A, Brottem L. Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3367-3376.
- [35] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 184-190.

- [36] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D A, Pak E W, Mahoney R, Vermote E F, El Saleous N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [37] Goetz S J, Fiske G J, Bunn A G. Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(3): 352-365.
- [38] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [39] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [40] Li N, Zhan P, Pan Y Z, Zhu X F, Li M Y, Zhang D J. Comparison of remote sensing time-series smoothing methods for grassland spring phenology extraction on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3383.
- [41] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 邓兴耀. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. *生态学报*, 2016, 36(19): 6198-6208.
- [42] 张涵丹, 卫伟, 薛莲. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 183-189.
- [43] 刘宪锋, 张锦水, 朱秀芳, 潘耀忠, 刘焱序, 张东海, 林志慧. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 288-302.
- [44] Sjöström M, Ardö J, Arneth A, Boulain N, Cappelaere B, Eklundh L, de Grandcourt A, Kutsch W L, Merbold L, Nouvellon Y, Scholes R J, Schubert P, Seaquist J, Veenendaal E M. Exploring the potential of MODIS EVI for modeling gross primary production across African ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(4): 1081-1089.
- [45] Ma C, Guo Z Z, Zhang X K, Han R M. Annual integral changes of time serial NDVI in mining subsidence area. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: s583-s588.
- [46] 马超, 刘玮玮, 赵鹏飞, 马雯思, 马威. 1962—2016 年达里诺尔流域水、草退化及气候响应. *地理研究*, 2017, 36(9): 1755-1772.
- [47] 吕洋, 董国涛, 杨胜天, 周秋文, 蔡明勇. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系. *资源科学*, 2014, 36(3): 603-611.
- [48] Hou X Y, Li M J, Gao M, Yu L J, Bi X L. Spatial-temporal dynamics of NDVI and Chl-a concentration from 1998 to 2009 in the East coastal zone of China: integrating terrestrial and oceanic components. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1): 267-277.
- [49] Wang Z, Liu S R, Sun P S, Guo Z H, Zhou L D. The variability of vegetation beginning date of greenness period in spring in the north-south transect of Eastern China based on NOAA NDVI. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2758-2761.