

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.046.

黄对, 彭安帮, 刘九夫, 等. 淮河中上游植被变化及其对气象因素的多时空尺度响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 268-278.

HUANG Dui, PENG Anbang, LIU Jiufu, et al. Multi Temporal and Spatial Scale Responses of Vegetation Dynamics to Climate Factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 268-278.

淮河中上游植被变化及其对气象因素的多时空尺度响应

黄对¹, 彭安帮¹, 刘九夫^{1,2}, 张建云¹, 王文种², 王文³

(1.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;

2.水利部 南京水利水文自动化研究所, 南京 210012; 3.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: [目的] 植被与气象因子关系的多时空特征有助于深入理解流域生态系统, 对生态环境保护具有重要意义。

[方法] 基于 MODIS EVI 数据与气象观测资料, 结合趋势分析、Mann-Kendall 检验和 Pearson 相关性分析方法, 分析淮河中上游 2001—2015 年植被动态并探讨流域至局地尺度的植被与降水、气温的相关关系。[结果] (1) 流域植被整体呈明显增长趋势 ($p < 0.05$), EVI 指数增长速率为 0.055/10 a, 冬季增速最大 (0.075/10 a)、夏季最小 (0.047/10 a), 不同地类增速差异显著。 (2) 年均 EVI 呈增加的区域占流域总面积的 93%, 其中呈显著 ($p < 0.05$) 及极显著 ($p < 0.01$) 上升趋势约占 82%, 华北平原 (主要为耕地) 增速最大, 山区、山丘区增速次之, 郑州市辖区等呈显著下降 ($p < 0.05$); EVI 变化的时空分布差异明显。 (3) 流域尺度春季 EVI 与同期 (3—5 月) 和 2—5 月降水呈显著正相关 ($p < 0.05$), 冬季 EVI 与同期降水呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 月 EVI 在 3 月、11 月与最低气温呈显著正相关 ($p < 0.05$), 在 12 月分别与最高气温、降水呈显著正相关 ($p < 0.05$) 和极显著负相关 ($p < 0.01$)。 (4) 局地尺度季、月 EVI 与气象因子的相关性有明显地区差异, 淮南的固始冬季植被与降水呈正相关, 淮北区域则与降水呈负相关; 从月来看, 驻马店在 2 月、11 月、12 月植被受各类气温的积极影响 ($p < 0.05$), 许昌植被对 4 月、7 月降水响应积极并有一个月的滞后响应 ($p < 0.05$), 固始植被在 7—8 月与降水、气温呈显著正、负相关 ($p < 0.05$), 9 月与最高、平均气温极显著负相关 ($p < 0.01$), 10 月植被对最高、最低气温存在一个月的滞后响应。[结论] 流域尺度 EVI、局地尺度 EVI 与气象因素的相关关系分别反映流域主要植被生长特点和植被变化驱动因素的地区差异, 研究结果可为流域生态建设、农业可持续发展提供理论支撑。

关键词: EVI; 降水; 气温; 多时空尺度; 响应特征

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0268-11

Multi Temporal and Spatial Scale Responses of Vegetation Dynamics to Climate Factors

HUANG Dui¹, PENG Anbang¹, LIU Jiufu^{1,2}, ZHANG Jianyun¹, WANG Wenzhong², WANG Wen³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing Automation

Institute of Water Conservancy and Hydrology, Nanjing 210012, China; 3. State Key Laboratory of

Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Objective] To profoundly understand the difference in vegetation response to climate at different spatiotemporal scales plays an important guiding role in ecological construction and sustainable agricultural development. [Methods] Firstly, the pattern and the dynamics change of EVI (enhanced vegetation index) and key driving climate factors (precipitation and the average, minimum and maximum air temperature) were investigated using the GRC method and the Mann-Kendall trend test, and then vegetation activity responses

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-03-10

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52109026, 91647203); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (Ss520026JG)

第一作者: 黄对 (1986—), 女, 湖南邵阳人, 博士, 高工, 主要从事水文遥感研究。E-mail: huangdui2004520@163.com

<http://stbcjy.paperonce.org>

to climate change at multiple spatial (from pixel scale to basin scale) and temporal scales (yearly, seasonal and monthly) were examined based Pearson correlation coefficient and t-test method. [Results] The average EVI of the middle and upper reaches of the Huaihe River basin showed a significant growth trend with a growth rate of 0.055/decade. EVI increased over 93% of the study area from 2001 to 2015, with a significant and extremely significant upward trend observed in 82% of the basin. The EVI in spring was significant positively affected by precipitation of the same period and the previous period ($p < 0.05$), and EVI in winter was significantly negatively affected by precipitation ($p < 0.01$). Monthly EVI showed a significant positive response to T_{\min} in March and November and a negative response to T_{\max} in September ($p < 0.05$), and in December positive and significant negative responses to T_{\max} and precipitation, respectively ($p < 0.05$). The correlation between seasonal and monthly EVI and meteorological factors on a local scale was different in different regions. EVI of Gushi located in south of the Huaihe River was positively affected by precipitation in winter, while other regions in the north of Huai River have no such correlation. In February, November and December, vegetation of Zhumadian was mainly positively affected by the temperature ($p < 0.05$). The precipitation in April and July had a positive effect on the vegetation in Xuchang ($p < 0.05$), and the vegetation had a one-month lag response to the precipitation in May and August. From July to August, the EVI in Gushi had a significant positive and negative correlation with the precipitation and temperature ($p < 0.05$) and a very significant negative correlation with the temperature in September, there was the one-month lag response of vegetation to temperature in October ($p < 0.01$). [Conclusion] The correlations between watershed-scale EVI and local-scale EVI and meteorological factors effectively reflect the regional differences of the main vegetation growth characteristics and vegetation change drivers in the watershed, respectively, and human activities have obvious positive and negative effects on vegetation in the cultivation and urban areas, which can provide theoretical support for ecological construction and sustainable agricultural development in the watershed.

Keywords: EVI; precipitation; temperature; multi temporal and spatial scales; response characteristic

植被是陆地生态系统的主体,也是全球气候变化的指示器,其动态变化对生态系统演变、水、碳循环具有重要意义^[1-3]。在气候变化与社会经济发展的背景下,全球植被在过去几十年发生显著变化^[4-5]。植被与气候关系一直是全球变化的关键问题,植被如何在不同时空尺度上响应气候变化研究有助于深入理解植被与气候的关系。

遥感数据是监测大范围植被动态的重要来源^[6],归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)广泛用于植被研究。AVHRR GIMMS与MODIS产品最为常用,GIMMS NDVI(1981—至今)数据噪声大、分辨率低(8 km),较小时空尺度不适用^[7];MODIS NDVI/EVI(16 day, 0.25~1 km)中EVI相比NDVI不易饱和、较少受大气气溶胶污染,易对冠层结构变化做出响应^[8-9]。

研究者通过探讨植被对气候的响应特征提升了对二者关系区域差异性和复杂性的认识^[4,6,10-12],不同时空尺度的植被尤其与气温、降水量联系紧密:寒冷区域的温度通常是植被生长的控制因子^[13-14],温带区域植被生长通常受温度和降水的影响^[15];亚热带

气温一般不会影响植被的季节循环,通常温度已超过植被生长所必需的最低温度;在降水量超出了植被所需最低降水阈值的区域,植被对于降水变化也不敏感^[16];干旱半干旱或者干湿季差异明显地区的降水对植被有显著的胁迫性^[5],尤其植被生长的开始期和持续时间受降水的控制较明显^[17]。植被对降水的响应亦存在滞后效应,通常与季节或更长时间尺度的降水变化有关,不同区域的响应时间差异明显^[18-22]。气候变暖差异也导致植被对气候变化的响应差异,大多数区域夜间气温上升速度比白天快^[3,23-24],比如在北半球寒带与干温带最高气温、最低气温与植被相关性的差异^[25],在我国的亚热带植被则大多与最高气温正相关,温带、荒漠植被对最低气温响应明显^[24]。此外,植被对气温以外的其他变量的响应特征可能会因气温升高而发生变化,比如增加对降水需求的阈值^[18]。以往研究主要集中于相对较大时空尺度,如全球、洲际/国家、流域/省、年际/季节相关性特征,较少或者涉及局地尺度、月尺度,由于植被对气候的响应包括不同时空尺度的生物物理与化学过程,植被与气象因素在不同时空尺度上的相关关系如何,是否具有更细节的植被响应特征仍值得探讨。

本文以淮河中上游为例,基于 MODIS EVI 数据探究 2001—2015 年植被覆盖的空间分布特征和变化趋势,研究不同时空尺度植被与气象因素的响应规律,包括植被对气象因素的时滞效应,为流域生态系统、作物生长指导提供参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

淮河流域为气候变化敏感区,淮河以南为亚热带湿润季风气候区,淮河以北为暖温带半湿润季风气候区。淮河干流流经河南、安徽、江苏三省,流域上中游位于河南与安徽两省境内,面积约 19 万 km^2 ,为我国重要的农业生产基地,流域西部与西南部为山区、丘陵区,分布有草地、林地,其余为广阔平原,耕地广泛分布。平均海拔 132 m,年均气温 $11\sim 16^\circ\text{C}$,由北向南、由东向西递增;多年平均降水量 920 mm,由南向北、由山区向平原递减;蒸发量南小北大,年均水面蒸发量为 $900\sim 1\,500\text{ mm}$ 。根据地形地貌可划分 7 个区域:伏牛山区、桐柏大别山区、淮南山丘区、淮南丘陵区、豫西山丘区、上游淮北平原区、中游淮北平原区(图 1)。

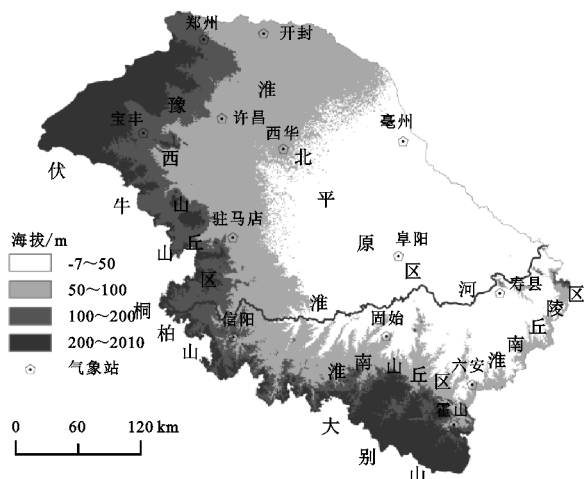


图 1 研究区概况

1.2 数据来源与预处理

气象数据来自中国气象科学数据共享网 <http://data.cma.cn/> 提供的逐日气象数据集,含流域 13 个国家标准气象站,包括日降水、日均气温、日最高气温与日最低气温,数据集为经来源单位进行质量控制后的成果,分别计算站点降水和各类气温的月、季、年值以及流域均值,以及获得经反距离加权法获得的 2001—2015 年平均年降水量空间分布图(图 2)。淮河以南大别山区年降水量最多、中部次之、流域平原北部降水最少,月降水主要集中于 5—9 月,与 1960—2015 年月均相比,6—8 月降水增加,其余月份减少或持平。2001—2015 年流域平均年降水量具有

极显著下降趋势($p < 0.01$),年平均气温有明显下降趋势($p < 0.1$)、年最高气温有显著下降趋势($p < 0.05$)、年最低气温呈不明显下降趋势。

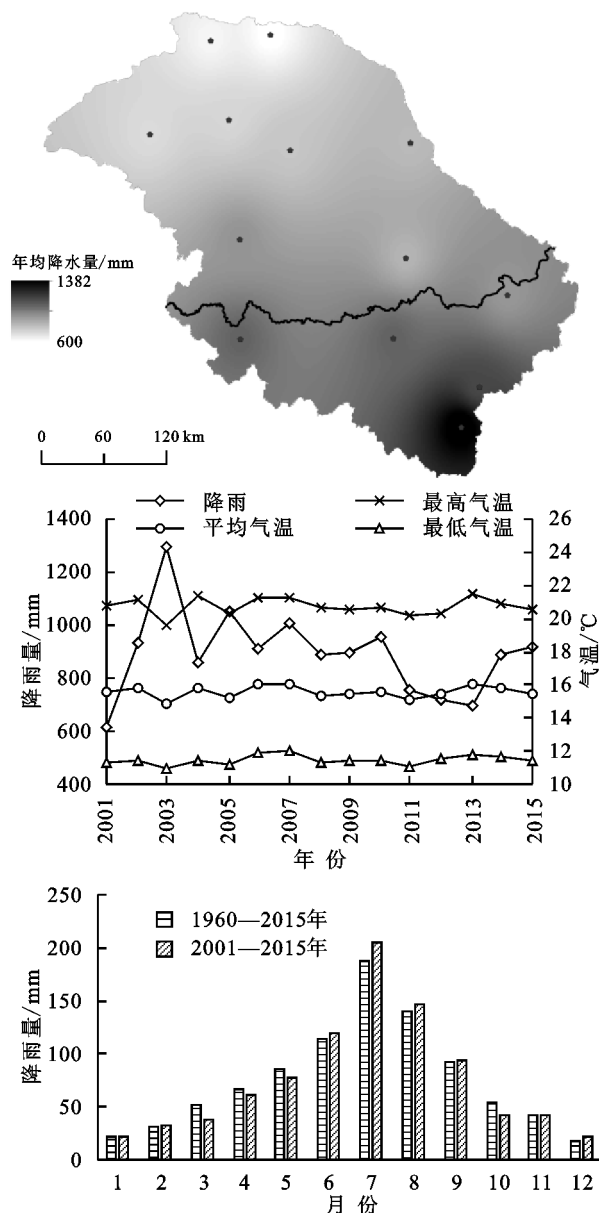


图 2 流域降水、气温数据的变化特征

遥感数据来源于美国国家航空航天局数据戈达德航天中心数据分发网站提供的 MODIS 产品数据 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)。植被数据为 MODIS13A1EVI,时空分辨率为 16 d,500 m,经裁切、重投影、去噪、掩膜等预处理,预处理基于 ENVI+IDL 进行。采用 4253 H 和 twice filter 去噪方法^[26]重建时序序列,减少卫星轨道、云覆盖等因素影响;利用最大值合成法^[27]合成逐月 EVI,减少云、大气、太阳高度角等因素干扰,基于逐月 EVI 获取季均、年均、年最大 EVI 影像,将 EVI 小于 0.05 的像元进行掩膜处理。

为了明确流域地表覆盖变化,选择 MODIS MCD12Q1 的国际地圈生物圈计划(IGBP)土地分类数据集(包含 17

个主要土地覆盖类型,空间分辨率为 500 m),将数据重新分为 7 类:林地、草地、湿地、耕地、建设用地、水域和其他用地,生成 2001—2015 年逐年地表覆盖数据,基于土地利用转移矩阵获得 2001—2015 年的土地利用转移分布图(图 3)。流域耕地、草地、林地、建设用地的多年平

均面积占比为 79.2%,9.8%,5.3%,2.6%,各地类面积占比最大变幅为 1.3%(草地),2001—2015 年地类的时空转换主要为淮北耕地转向建设用地,淮河干流附近、豫西山丘区的草地、湿地转向耕地,淮南山区、山丘区主要为林地转向草地、耕地转向草地。

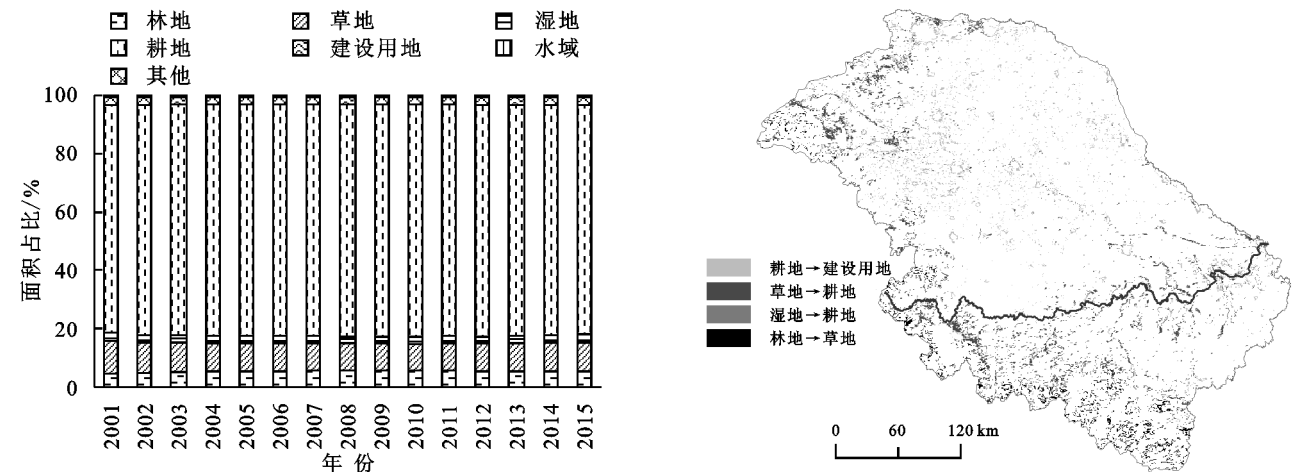


图 3 2001—2015 年逐年土地利用类型面积占比、2001—2015 年土地利用转换空间分布

2 研究方法

2.1 植被变化分析

采用 GRC 方法^[28]评估 EVI 变化,GRC 定义为某个时期内植被年际变化的最小幂函数线性回归方程的斜率,对于流域尺度 EVI,将 10 倍斜率值定义为变化幅度以分析流域尺度 EVI 时序变化特征;对于像元尺度 EVI,使用最小二乘法模拟区域每个 EVI 像元的年际、季节的时间趋势,基于 GRC 计算植被变化范围(Range)以及植被相对于某一年的变化比例(Percentage),其中 Range 指示 EVI 的变化范围,Range 大于 0 表明 VI 呈增加趋势,反之则减少。Percentage 表示植被变化范围,为研究末期相对于初期植被指数的比值,用百分比表示。计算公式如下:

GRC= (n * sum(EVI_i) - sum(i * EVI_i)) / (sum(i^2) - (sum(i))^2 / n) * sum(EVI_i) (1)

Range=GRC * (n - 1) (2)

percentage=100 * Range/EVI_2001 (3)

式中:n 代表年数;EVI_i 为第 i 年的 EVI 值。

利用 Mann—Kendall 趋势检验法检验 2001—2015 年每个像元植被变化的显著性,判断趋势变化是否显著,检验结果由变化率 τ 值和显著性水平 p 值反映变量的趋势性变化情况,其中变化率 τ>0,τ<0,τ=0 分别表示趋势增加、趋势减小、没有变化;显著性水平 p≤0.01,0.01<p≤0.05,0.05<p≤0.1

分别表表示变化趋势极显著、变化趋势显著、变化趋势轻微,组合起来共分为 7 类^[29]。

2.2 相关性分析

Pearson(皮尔逊)相关系数是定量描述两个变量之间线性相关关系的指标,通过提取 2001—2015 年流域和局地尺度的 EVI,计算其与对应尺度气象因子(降水和气温)在年际、季和月的相关系数,相关系数代表植被对气象因素的敏感性,指示 EVI 与气候因子之间关系的强度,相关系数越大表明变量之间的相关程度越强,并采用 t 统计量进行显著性检验^[30]。

3 结果与分析

3.1 流域植被时空变化特征

将 EVI 分为低(0.05~0.25)、中(0.25~0.45)、高(>0.45)覆盖 3 类。流域多年平均 EVI(EVI_{mean})反映年 EVI 空间分布基本特征,EVI_{max} 反映年内最好季节的植被覆盖(图 4)。淮北平原、山区植被为高覆盖,其他区域为低、中等覆盖,郑州等城镇植被覆盖最低。2001—2015 年 EVI_{mean} 和 EVI_{max} 均呈波浪式发展且显著增加趋势(p<0.05),变化幅度为 0.055/10 a。从不同下垫面看(图 5),耕地和林地年均 EVI 呈显著上升、草地呈显著下降(p<0.01),林地的植被覆盖度最大,耕地最小,2007 年起耕地植被覆盖度超过草地并于 2013 年与林地持平,结合标准差来看,林地的年际差异最小,草地逐年减小,耕地年际差异较大但从 2013 年起明显减少,从逐年地类变化看流域耕地面积变化较小,由流域降水和气温条件

看2013年并非旱涝年(2003年、2009年分别为特大洪水、严重干旱年份,EVI流域均值和标准差有所降低),根据河南省国土资源公报,2013—2015年河南大力开展高标准基本农田建设任务,流域境内安徽省也开展了“十二五”高标准基本农田建设,提升了流域耕地质量、改善农业生产条件,耕地标准差明显减少可能与此有关。从年最大EVI来看,耕地年际波动最大,林地增幅最大,草地最小。从季节变化看,各季EVI均呈波浪式发展且逐渐上升的趋势,年际增长速率冬季最大(0.0075/a)、夏季最小(0.0047/a)。2001—2015年各月EVI波动情况相近月EVI都呈显著上升趋势($p < 0.05$),月

EVI变化幅度介于0.043~0.081/10a(表1)。可知15年间流域植被覆盖总体改善良好。

与其他区域的植被覆盖改善对比看,淮河中上游流域尺度EVI指数变化率为0.055/10a,与安徽、山西、陕西省(0.05~0.06/10a)变化率接近^[30-32],高于长江流域^[33]以及江西、湖南和广西(约为0.04/10a)^[34-36],低于黄河流域(0.068/10a)^[37],但远大于黄河支流黑河、渭河等流域^[38-39]以及华北平原(0.027/10a)^[40]和河南省(0.042/10a)^[41],增长差异可能与研究区自然条件、数据来源/植被指数类型、空间分辨率、研究时段等多因素有关,仍可表明研究流域植被覆盖的极大改善。

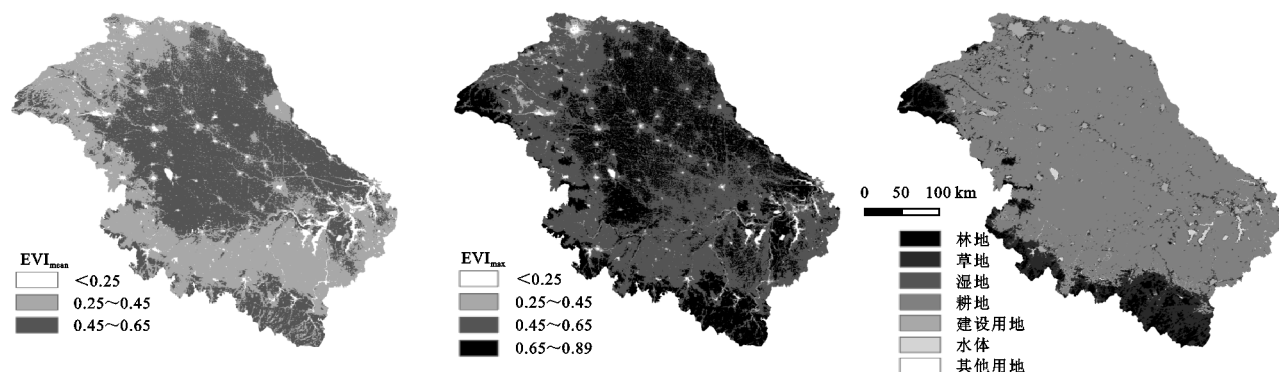


图4 EVI_{mean}, EVI_{max}以及2015年地类空间分布

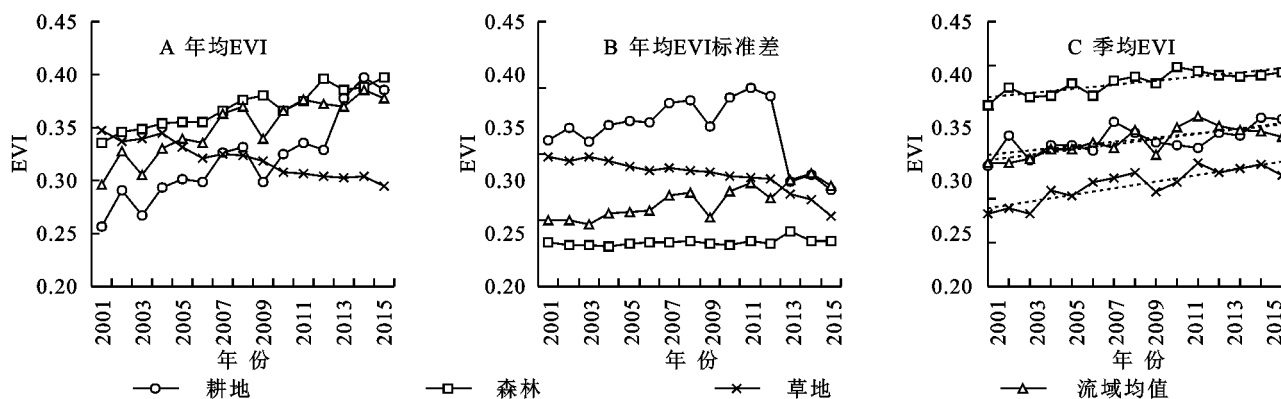


图5 流域主要地类的平均年均EVI、季均EVI的年际变化

表1 2001—2015年各月EVI多年平均值与变化幅度

参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
均值	0.213	0.276	0.336	0.394	0.442	0.476	0.479	0.447	0.366	0.29	0.251	0.226
变化幅度	0.081	0.048	0.044	0.051	0.053	0.05	0.044	0.043	0.051	0.068	0.07	0.073

从流域像元EVI年际变化趋势看(图6),2001—2015年大部分区域(约占流域面积的93.2%)年均EVI有所增加($GRC > 0$),其中呈显著($p < 0.05$)及极显著($p < 0.01$)增加趋势的面积占比82%,主要位于淮北平原区、大别山区、淮南山区和丘陵区,淮北平原EVI增加最多(40%~60%),淮南山区增长最少(<20%),其他区域增加20%~40%。EVI季节变化呈明显的空间异质性。春、夏、秋、冬四季,植被呈显著($p < 0.05$)及极显

著($p < 0.01$)上升的区域分别约占全流域的48.2%,42%,67%,64%。其中春、秋、冬季植被增长区主要位于淮北平原和淮南山区与丘陵区,夏季植被增长区则主要位于流域上游和大别山区。春季,平原、山区的植被增长比例分别为15%~25%、<10%,而城镇区的植被减少比例小于15%。冬季,平原区植被增加比例15%~35%,淮南山区和丘陵区低于5%。总体来看,植被呈显著与极显著增加的区域在秋冬季最

多、夏季最少, 无变化及负增长在夏季最多、冬季最少, 无变化及负增长区域且主要位于淮河以南的固始与淮河以北的郑州、开封、宝丰城镇区, 植被增长最快的区域主要为淮北平原区。

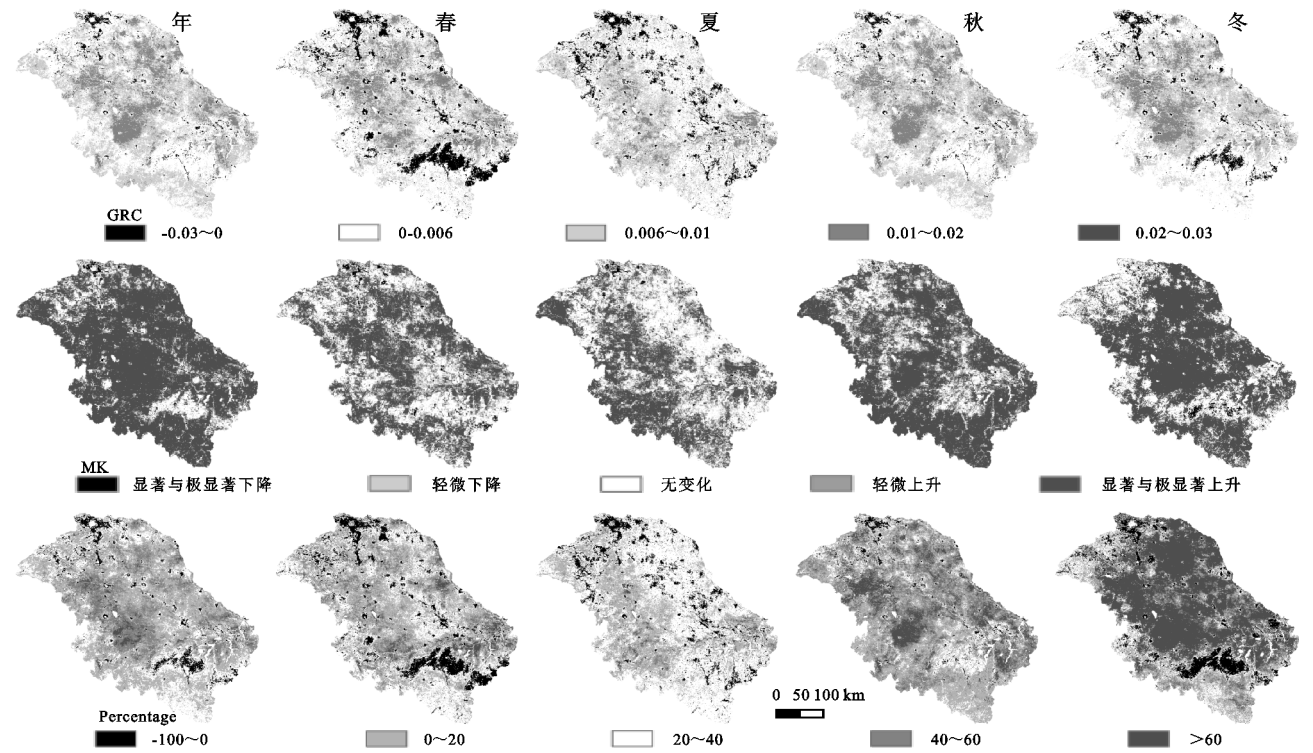


图 6 淮河上中游流域 2001—2015 年 EVI 变化的空间分布

从不同区域 EVI 增幅看, 由于耕作区与人类活动密切, 耕作区增幅明显大于林地和草地一定程度反映人类活动对耕作区植被改善的积极作用, 已有研究也有所证实^[40]。结合 2001—2015 年年 EVI 趋势变化与地类转换空间分布看, 林地转向草地区域的植被无变化趋势, 耕地转向建设用地区域的植被为无变化/显著下降趋势, 一定程度体现人类活动对植被所起的消极作用。

3.2 植被与气象因素关系的多时空尺度特征

3.2.1 流域尺度植被与气象因素的年、季、月相关性

流域尺度 EVI 与降水、气温在当年与滞后年、不同季节、月尺度的皮尔逊相关系数见表 2—3。从年尺度看, 植被与年降水呈负相关, 与各类气温呈正相关, 受前一年降水与最低气温的影响大, 总体相关性不明显。这可能由于流域尺度植被与气象因素分别来自于像元均值和站点均值, 且流域地类主要为耕地, 人工灌溉对早期植被生长有一定积极影响。

从不同季节看, 以春季为例, 同期为 3—5 月, 前期为 2—4 月, 前期加同期为 2—5 月, 3 个时期分别标记为 s , f 和 a 。春季 EVI 与前期、前期加同期的降雨有显著 ($p < 0.05$) 的正相关, 与不同时期的 T_{mean} 呈正相关, 表明降水对春季植被生长影响大, 植被生长对降水响应存在时间滞后, 但同时受 T_{min} 的影响,

最低气温越高, 植被生长越好。夏季 EVI 与不同时期的 T_{max} 、降水的相关系数均为负, 与 T_{min} 呈正相关, 表明在降水丰富、高温夏季, 降水增加没有促进植被生长, 可能高温环境中蒸散量增加阻碍了植物生长。秋季 EVI 与不同时期的降水量呈正相关, 与气温呈弱的正相关, 表明秋季降水增加可以促进植被的生长, 并延迟植被进入衰退期的时间。冬季 EVI 与同期降水量呈明显负相关, 与气温关系较弱, 冬季气温低, 降水增加对植被生长有负面影响。

全部月 EVI 与当月、前 1—3 月的降水、气温的皮尔逊相关系数见表 2。可知月 EVI 与当月以及前 1 月的气温和降水呈显著正相关 ($p < 0.01$), 与前 1 月和前 2 月的温度和降水弱相关, 表明植被受当月、上月的气温和降水的影响很大。从月 EVI 与当月 T_{mean} 、月降水的散点图(图 7)可知, $10 \sim 28^\circ\text{C}$ 时 EVI 增速最快, 可能是该流域植被生长的最佳温度范围, 当温度超过此范围时植被蒸散量增加, 植被生长可能受到抑制, 当月降水量在 $0 \sim 160 \text{ mm}$ 时, EVI 的增速较大, 之后增速变缓并趋于稳定。

从各月相关性看(表 3)植被与 T_{min} 在 3 月、11 月显著正相关 ($p < 0.05$), 在其他月份的正相关弱, 表明最低气温的升高可能对流域尺度植被生长具有积极作用; 在 9 月与 T_{max} 呈负相关, 表明最高气温升高对

植被的抑制作用;在12月份降水增加对植被生长的抑制和最高气温升高对植被生长的促进。

结合流域尺度植被与气象要素的相关性和流域主要作物冬小麦生长特性看,11月、次年3月(分蘖期、拔节期)最低气温升高有助于作物生长、12月(越冬期)需防止低温伤害、3—4月(拔节—抽穗期)需水量极大,表明流域尺度相关性能较好体现主要作物生长特性。

3.2.2 局地尺度植被与气象因素的年、季、月相关性分析了6个气象站点从500 m×500 m~20 km×20 km空间的年、季、月平均EVI与气象因素间的关系。其中宝丰、许昌和西华、阜阳位于淮河以北的中游,驻马店位于淮河以北的上游,固始位于淮河以南的中游。宝丰、阜阳、西华EVI在不同距离的EVI均值无明显变化,驻马店、许昌在7 km,3~5 km处EVI均值发生明显变化,其中驻马店EVI明显增加,许昌部分缺失,可能与植被类型、植被覆盖度明显改变相关。

由图8可知,从年相关性看,西华植被与 T_{\min} 在5~20 km显著正相关($p<0.05$),驻马店在7~20 km与 T_{\min} 显著负相关($p<0.05$),总体植被与气象因子的关系不显著。季节相关性则因地区和季节而异,春季,宝丰、阜阳、驻马店和固始的植被与 T_{\min} 负相关,秋季 T_{\min} 与植被均呈正相关。冬季,降水对除固始以外的所有地区的植被都有负面影响。冬季,位于淮南的固始相比于淮北区域明显不同,可能固始冬季降水相对较多且平均最

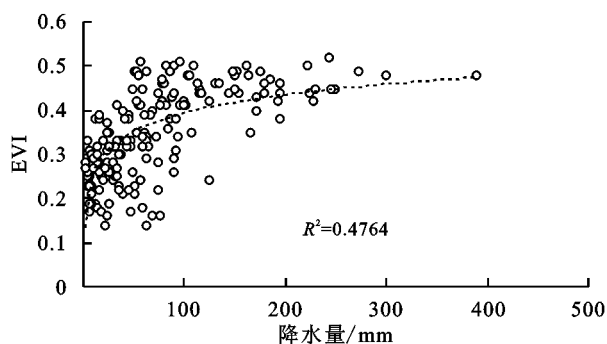


图7 月EVI与月均降水量和气温相关性

表3 EVI与气象要素的逐月相关性

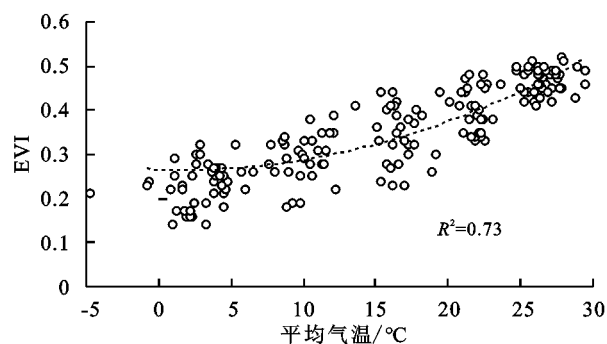
月份	$RVI-p$	$RVI-T$		
		T_{mean}	T_{max}	T_{min}
1月	0.41	0.06	0.12	0.00
2月	0.13	0.14	0.16	0.10
3月	0.11	0.35	0.17	0.54**
4月	0.45	0.11	0.18	0.04
5月	0.38	0.07	0.03	0.25
6月	-0.31	-0.13	-0.19	0.06
7月	-0.24	0.00	0.00	0.08
8月	0.18	0.21	0.19	0.24
9月	0.43	-0.39	-0.49*	0.06
1月	-0.27	0.22	0.16	0.32
11月	0.28	0.37	0.16	0.53**
12月	-0.64***	0.44	0.54**	0.12

低气温大于0℃,降水增加未对植被产生负面影响。结合EVI值变化来看,驻马店、许昌植被与气象因素的年、季相关性在EVI明显变化处亦具有明显变化。

表2 EVI与气象要素的年、季相关性

类型	尺度	时滞	$RVI-p$	$RVI-T$		
				T_{mean}	T_{max}	T_{min}
EVI	年	0	-0.21	0.17	0.12	0.34
		1	-0.37	0.26	0.22	0.48*
EVI_{max}	年	0	-0.08	-0.03	-0.08	0.17
		1	-0.46*	0.32	0.31	0.46*
		s	0.55**	0.08	-0.09	0.46*
	春	f	0.35	0.06	-0.06	0.18
		a	0.59**	0.43*	0.37	0.47*
		s	-0.27	0.06	0.03	0.15
	夏	f	-0.33	-0.05	-0.13	0.11
		a	-0.18	0.07	-0.007	0.22
EVI		s	0.45*	-0.18	-0.26	-0.07
	秋	f	0.44*	0.16	0.05	0.36
		a	0.37	0.27	0.14	0.40
		s	-0.64***	-0.008	0.15	-0.23
	冬	f	-0.22	0.07	0.02	0.18
		a	-0.28	-0.004	-0.12	0.22
		0	0.70***	0.88***	0.89***	0.87***
	月	1	0.50**	0.60**	0.60**	0.57**
		2	0.19	0.15	0.16	0.11
EVI		3	0.26	-0.34	-0.32	-0.37

注:*,**和***分别表示通过了0.1,0.05,0.01的显著性水平检验,下同。



相关分析表明:驻马店植被在2月、3月、11月、12月与各类气温主要为显著正相关($p<0.05$),其中2月 T_{max} 对3月植被生长有积极作用;许昌植被在4月、5月、7月、8月与降水有显著正相关($p<0.05$),4月、7月降水分别具有滞后影响效应;固始在7月、8月与各类气温、降水分别呈负相关和正相关($p<0.05$),9月 T_{max} , T_{mean} 对植被显著负面影响($p<0.01$),9月份 T_{mean} 极大影响10月份植被生长;阜阳在11月与 T_{mean} 及 T_{min} 、降水分别呈显著正、负相关($p<0.05$),宝丰在1月与 T_{max} 正相关($p<0.1$),在11月与降水显著负相关($p<0.05$)。

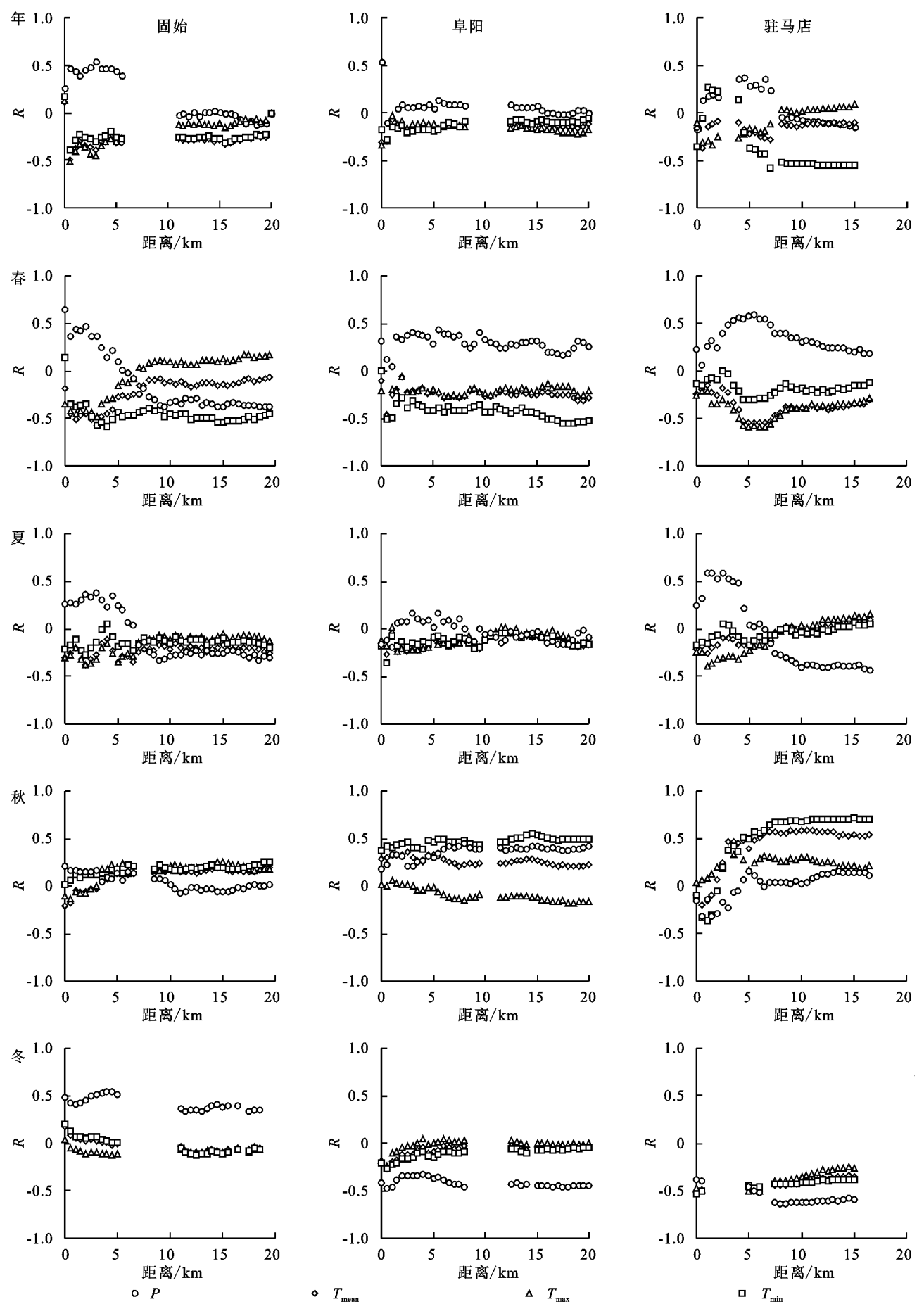
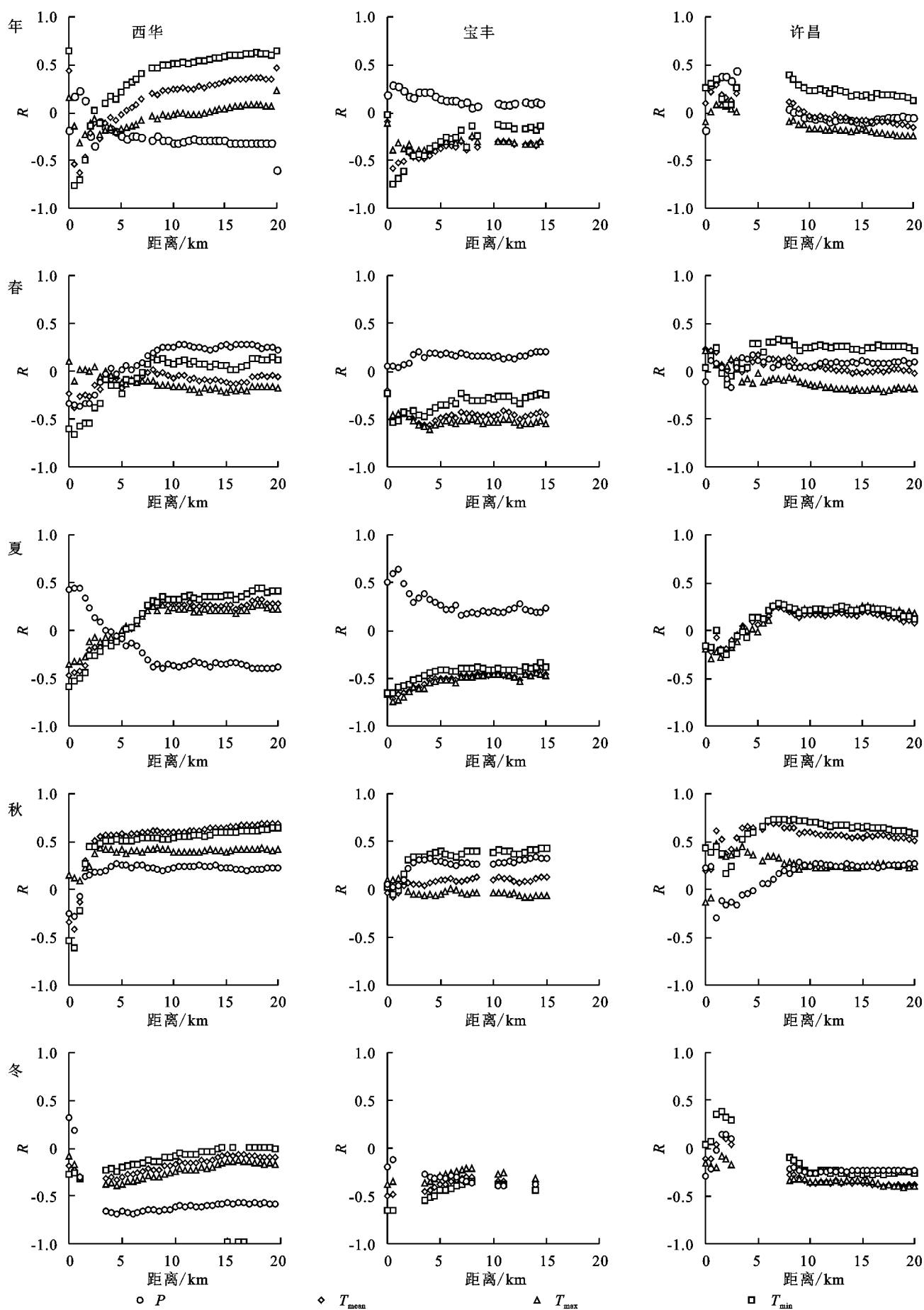


图 8A 局地尺度年 EVI、季节 EVI 与降水, T_{max} , T_{mean} , T_{min} 的相关系数

图 8B 局地尺度年 EVI、季节 EVI 与降水, T_{\max} , T_{mean} , T_{\min} 的相关系数

局地尺度植被指数与气象因素相关关系的已有研究少,许昌地区植被受降水影响、驻马店与气温显著相关、固始与降水及气温显著相关等特点表明植被生长驱动因素存在明显区域差异,结合植被变化的气候因子驱动分析中将驱动因素分为降水、气温、气温与降水驱动型、非气候因子驱动型4种^[42]来看,局地尺度的植被与气象因素的相关性能较好反映驱动因素的区域差异。

4 结论

(1) 2001—2015年流域尺度EVI呈现明显的增长趋势,EVI增长速率为0.055/10 a,流域植被显著改善。

(2) 流域年均EVI呈增加的面积占总流域面积的93%,其中82%的区域呈显著及极显著上升趋势,空间上淮北平原区耕地EVI增幅最大,其次为流域山区、山丘区(主要地类为林地、草地)。流域植被变化呈显著时空差异,人类活动对耕作、城镇区的植被分别具有明显的积极与消极影响。

(3) 流域尺度的EVI与气象因素的年、季、月相关性总体上反映流域主要植被类型的生长特点,局地尺度的EVI与气象因素的年、季、月相关性能有效反映植被变化的驱动因素的地区差异。

参考文献:

- [1] Yan J, Zhang G, Deng X, et al. Does climate or human activity lead to the degradation in the grassland ecosystem in a mountain-basin system in an arid region of China? [J]. Sustainability, 2019,11(9):1-15.
- [2] Lei H, Yang D, Huang M. Impacts of climate change and vegetation dynamics on runoff in the mountainous region of the Haihe River basin in the past five decades [J]. Journal of Hydrology, 2014,511:786-799.
- [3] Xia J, Chen J, Piao S, et al. Terrestrial carbon cycle affected by non-unicorm climate warming[J]. Nature Geoscience, 2014,7(3):173-180.
- [4] Eastman J, Sangermano F, Machado E, et al. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index(NDVI),1982-2011[J]. Remote Sensing, 2013,5(10):4799-4818.
- [5] Liu Y, Li Y, Li S, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends:correlations with climate and human factors[J]. Remote Sensing, 2015,7(10):13233-13250.
- [6] Guang X, Huifang Z, Baozhang C, et al. Changes in vegetation growth dynamics and relations with climate over China's Landmass from 1982 to 2011[J]. Remote Sensing, 2014,6(4):3263-3283.
- [7] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2005,20(9):503-510.
- [8] Huete, A, Didan, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing Environment, 2002,83(1/2):195-213.
- [9] 杨强,王婷婷,陈昊,等.基于MODIS EVI数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征[J].农业工程学报,2015,31(22):191-198,315.
- [10] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(11):2345-2364.
- [11] Piao S, Mohammad A, Fang J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. Global Environmental Change, 2006,16(4):340-348.
- [12] Jiang, L L, Jiapaer G L, Bao A M, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. Science of the Total Environment, 2017,599 (5):967-980.
- [13] 张园,袁凤辉,王安志,等.2001—2018年长白山自然保护区生长季NDVI变化特征及其对气候变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(4):161-170.
- [14] 郭金停,胡远满,熊在平,等.中国东北多年冻土区植被生长季NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J].应用生态学报,2017,28(8):2413-2422.
- [15] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data [J]. Global Change Biology, 2004,10(7):1133-1145.
- [16] Davenport M, Nicholson S E. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in East Africa [J]. Int. J. Remote Sens.,1993,14(12):2369-2389.
- [17] Spano D, Cesaraccio C, Duce P, et al. Phenological stages of natural species and their use as climate indicators [J]. International Journal of Biometeorology, 1999,42(3):124-133.
- [18] 高江波,焦珂伟,吴绍洪.1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J].地理学报,2019,74(3):534-543.
- [19] 方利,王文杰,蒋卫国,等.2000—2014年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J].地理科学,2017,37(11):1745-1754.
- [20] 孙钦明,刘彤,韩志全,等.遥感分析天山北部植被覆盖

- 对气候变化的多时间尺度响应[J].农业工程学报, 2014,30(15):248-255.
- [21] 周玉科.青藏高原植被 NDVI 对气候因子响应的格兰杰效应分析[J].地理科学进展,2019,38(5):718-730.
- [22] 王艳召,王泽根,王继燕,等.近 20 年中国不同季节植被变化及其对气候的瞬时与滞后响应[J].地理与地理信息科学,2020,36(4):33-40,76.
- [23] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. The physical science basis: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge U K: Cambridge University Press, 2007.
- [24] 庞博,张鹏岩,逯承鹏,等.1982—2015 年昼夜不对称增温下中国自然植被动态响应及差异[J].应用生态学报,2018,29(7):2362-2372.
- [25] Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J]. Nature, 2013,501(7465):88-92.
- [26] Velleman P F. Definition and comparison of robust nonlinear data smoothing algorithms[J]. Journal of the American Statistical Association, 1980,75(371):609-615.
- [27] 张月丛,赵志强,李双成,等.基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势[J].地理研究,2008,27(4):745-754.
- [28] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(5):1111-1117.
- [29] 王文,黄瑾,崔巍.云贵高原区干旱遥感监测中各干旱指数的应用对比[J].农业工程学报,2018,34(19):131-139,309.
- [30] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].生态学报,2022,42(3):1022-1033.
- [31] 邓凯,黄长江,袁慧慧,等.基于 MODIS 的 2007-2017 安徽省植被指数时空变化特征研究[J].黑龙江工程学院学报,2018,32(6):24-27.
- [32] 窦永静,王让虎,付含培,等.山西省植被 NDVI 时空变化及驱动力研究[J/OL].山西大学学报:自然科学版, 2022,DOI:10.13451/j. sxu. ns.2021113.
- [33] 袁喆,喻志强,冯兆洋,等.长江流域陆地生态系统 NDVI 时空变化特征及其对水热条件的响应[J].长江科学院院报,2019,36(11):7-15.
- [34] 陆晴,刘根林,缪利,等.2000—2018 年江西省 NDVI 时空演变特征及其与气候因子关系分析[J].东华理工大学学报:自然科学版,2021,44(4):370-376.
- [35] 杨艳萍,陈建军,覃巧婷,等.2000—2018 年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J].农业工程学报,2021,37(17):234-241.
- [36] 桑国庆,唐志光,邓刚,等.基于 MODIS NDVI 时序数据的湖南省植被变化研究[J].长江流域资源与环境, 2021,30(5):1100-1109.
- [37] 张乐艺,李霞,冯京辉,等.2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J].水土保持通报,2021,41(5):276-286.
- [38] 尤南山,蒙古军,孙慕天.2000—2015 年黑河流域中上游 NDVI 时空变化及其与气候的关系[J].北京大学学报:自然科学版,2019,55(1):171-181.
- [39] 张林齐,任立良,江善虎,等.1982—2015 年渭河流域植被变化特征及气候因素影响[J].水文,2018,38(2):66-72.
- [40] 谷金芝,宫兆宁.2001—2015 年华北平原植被覆盖度时空变化特征及影响因素分析[J].测绘与空间地理信息,2018,41(8):47-51.
- [41] 李新鸽,朱连奇,陈超男.2000—2015 年河南省植被 NDVI 时空变化特征分析[J].河南大学学报:自然科学版,2018,48(5):554-564.
- [42] 陈云浩,李晓兵,史培军.1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J].植物生态学报,2001,25(6):716-720.