靖娟利,唐 兵,赵 婷,等.长江流域生长季 NDVI 对昼夜不对称增温及降水的响应 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5756-5768.
Jing J L, Tang B, Zhao T, et al. Response of the NDVI to asymmetric diurnal temperature increases and precipitation changes during the growing season in the Yangtze River Basin [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5756-5768.

长江流域生长季 NDVI 对昼夜不对称增温及降水的响应

靖娟利*,唐 兵,赵 婷,欧红飞,王永锋 (桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林 541006)

摘要：长江流域作为关键的生态安全屏障,深入理解其生长季 NDVI 对气候变化的响应,对于长江流域生态环境保护策略的有效实施至关重要.本文利用 2000~2020 年 MODIS NDVI 数据以及同期气象数据,运用趋势分析法、偏相关分析等方法并结合 GIS 空间统计分析等方法,探讨了长江流域生长季 NDVI 对昼夜温度及降水的响应特征.结果表明:2000~2020 年长江流域生长季 NDVI 整体呈波动增加趋势,增速为 0.021/10a;除太湖流域外,其他子流域NDVI均呈极显著增加趋势.NDVI 呈增加趋势的面积占比为 84.19%,太湖流域超过 60%的区域呈减少趋势,其余子流域以增加趋势为主.生长季 *T*max、*T*min 和降水量均呈不显著上升趋势,*T*min 的增加速率约为 *T*max 的 1.55 倍,昼夜增温速率表现出不对称性,除金沙江流域外,其他子流域与研究区变化趋势相似.空间上,生长季 *T*max、*T*min 和降水量呈增加趋势的区域占比为 68%~79%,以太湖和乌江流域增加趋势最为明显.生长季 NDVI 对 *T*max、*T*min 和降水量的响应表现出一定空间异质性,植被生长受 *T*min 和降水量显著影响的范围较 *T*max 更广泛.生长季 NDVI 对 *T*min、降水量和 *T*max 的平均滞后响应时间分别为 1.3 个月、1.4 个月和 1.6 个月;不同子流域及不同植被类型 NDVI 对 *T*max、*T*min 和降水量的响应有一定差异.

关键词：生长季 NDVI；昼夜增温；不对称变化；时滞效应；长江流域
中图分类号：X173 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5756-13

Response of the NDVI to asymmetric diurnal temperature increases and precipitation changes during the growing season in the Yangtze River Basin. JING Juan-li*, TANG Bing, ZHAO Ting, OU Hong-fei, WANG Yong-feng (College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5756~5768

Abstract：The Yangtze River Basin is an important ecological barrier in China. Understanding the response of the NDVI to climate change during the growing season is important for the effective implementation of ecological and environmental protection strategies. In this study, on the basis of MODIS NDVI data and meteorological data from 2000 to 2020, the response of the NDVI to diurnal temperature and precipitation changes during the growing season was studied through trend analysis, partial correlation analysis and GIS spatial statistical analysis methods. The results revealed the following: from 2000~2020, the growing season NDVI exhibited a fluctuating increasing trend in the Yangtze River Basin, with a growth rate of 0.021/10a. The NDVI exhibited an increasing trend in all subbasins except for Taihu Lake. The overall NDVI exhibited an increasing trend, accounting for 84.19% of the study area, and all subbasins exhibited increasing trends, with the exception of the Taihu Basin, which showed a decreasing trend (60%). (2) During the growing season, Tmax, Tmin and precipitation showed insignificant upward trends, and the increase rate of Tmin was approximately 1.55 times that of Tmax, indicating asymmetric diurnal warming. At the subbasin scale, the change trend was similar to that in the study area except for the Jinsha River Basin. Spatially, Tmax, Tmin and precipitation showed increasing trends, with proportions ranging from 68% to 79%, especially in the Taihu and Wujiang River Basins. The responses of the NDVI to Tmax, Tmin and precipitation during the growing season exhibited spatial heterogeneity, and the range of vegetation growth significantly affected by Tmin and precipitation was greater than that affected by Tmax. The average lag times of the responses of the NDVI to Tmax, Tmin and precipitation during the growing season were 1.6, 1.3 and 1.4 months, respectively. The response characteristics differed across subbasins and vegetation types.

Key words：growing season NDVI；diurnal temperature increase；asymmetric changes；time lag effect；Yangtze River Basin

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在碳循环、水平衡和能量转换中均发挥着重要作用[1].归一化植被指数(NDVI)作为表征地表植被生长状况的重要指标,是地表环境与气候变化的指示器[2].IPCC 第六次评估报告指出,人类活动导致全球气温持续上升[3],昼夜增温速率表现出不对称性特征[4-5].此外,由于植物光合作用主要受白天增温的影响,而

收稿日期：2025-03-07
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42161028)
* 责任作者, 教授, 2003080@glut.edu.cn

植物呼吸作用同时受昼夜增温的影响,因此昼夜增温对植物的碳吸收和消耗也将产生不同的影响[6-7].因此,揭示植被对昼夜不对称增温的响应特征对全面认识植被-气候响应机理及环境管理具有重要意义.

近年来,昼夜不对称增温对植被的影响受到诸多学者关注.以往研究指出,在全球尺度上,北半球昼夜增温表现出不对称性[6],高纬度地区白天增温对植被的积极影响和夜间增温对植被的消极影响均在减弱,而在中纬度地区昼夜增温对植被生长的影响变化不大[8];另有研究指出北半球植被活动对昼夜不对称增温的响应方向具有一致性,在水分充盈区昼夜增温均能促进植被活动,而在水分亏缺区昼夜增温则会抑制植被活动[9].我国昼夜增温在各季节均表现出不对称的上升趋势,且春冬两季白天增温速率快于夜间,而夏秋两季则相反;植被活动受白天增温的影响程度大于夜间增温, 昼夜增温对春秋两季植被生长多为正向促进作用[10]. 在不同区域,昼夜增温对植被的影响亦表现出一定差异性.例如,在新疆地区夜间增温速率约为白天的 1.5 倍,其对植被的影响范围和程度均高于白天增温,夜间增温对针叶林、草原、草甸和农业植被生长均有明显促进作用[11].在青藏高原地区昼夜增温对植被生长均起到正向作用,植被对夜间增温更敏感 [12].在秦巴山地夜间增温速率是白天的 1.3 倍,白天增温对大部分植被生长有积极影响,而夜间增温则有消极影响[13].而在我国东北部松嫩平原西部地区,夏季白天增温对沼泽植被的净初级生产力有明显抑制作用,而夜间增温则有促进作用[14].在青海地区昼夜增温存在明显的季节差异,秋季植被生长受昼夜增温影响最为显著,且白天增温对植被生长的积极作用较夜间增温更明显[15].此外,亦有研究结果显示,在全球范围内植被对昼夜不对称增温的滞后响应时间表现出非均一性;相较于夜间增温,在中高纬和高海拔地区植被对白天增温的滞后时间更长,而在其他地区则更短[16].可见,在探究昼夜增温对植被的影响时有必要考虑其滞后效应.

长江流域作为亚洲第一大流域,其植被覆盖变化及其对气候的响应研究受到广泛关注.已有研究表明,1982~2015 年长江流域生长季植被 NDVI 呈增长趋势,温度是控制植被生长的主导因子,而降水的作用相对较弱[17],植被生长对降水和温度的响应均表现出一定滞后效应[18].然而,以往研究多集中在揭示植被对平均气温的响应,顾及植被对气候响应的滞后效应,并从子流域尺度探究植被生长对昼夜增温响应差异性的研究不多.鉴于此,本研究基于长江流域 2000~2020 年 MODIS NDVI 数据,同期最高温度、最低温度以及降水量等数据,运用趋势分析、偏相关分析、统计分析等方法,探究生长季 NDVI 对昼夜不对称增温及降水的响应机制,以期为全面认识植被-气候响应机理提供参考.

1　材料和方法

1.1　研究区概况

长江流域位于 90°33'~122°25'E,24°30'~35°45'N 之间,横跨我国东部、中部和西部 19 个省(区,市),总面积约为 180 万 km^2.流域内地形地貌复杂多样,地势西高东低,横跨我国地势三级阶梯(图 1).

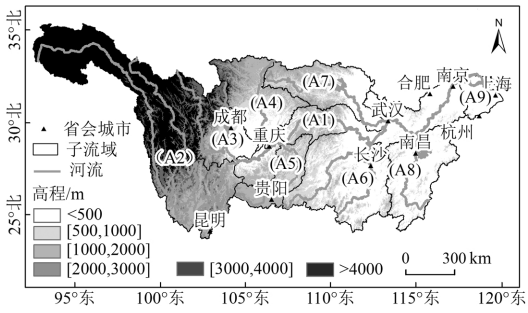


图 1　长江流域地形及植被覆盖空间分布

Fig.1　Spatial distribution of terrain and vegetation cover in the Yangtze River Basin

根据长江流域 1:25 万二级流域分级数据集,长江流域可划分为 9 个子流域,长江干流区(A1)、金沙江(A2)、岷江(A3)、嘉陵江(A4)、乌江(A5)、洞庭湖(A6)、汉江(A7)、鄱阳湖(A8)和太湖(A9)流域.流域内大多数地区处于亚热带季风气候区,气温呈东高西低、南高北低的空间分布格局,降水充足但空间分布不均,呈东南向西北递减的趋势.流域内植被类型丰富,包括栽培植被、林地、灌木林、混合林和草地等.

1.2　数据来源与处理

1.2.1　NDVI 数据　NDVI 数据为 2000~2020 年逐月 MOD13A3 NDVI 数据,空间分辨率 1km,来源于美国国家航空局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)(https://www.nasa.gov/). 使 用

MRT 对下载的影像进行格式转换、投影、拼接等预处理,将 4~10 月的 NDVI 进行最大值合成,得到年尺度生长季 NDVI 数据集.

1.2.2 气候数据 气候数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/),包括 2000~2020 年逐月降水量、最低温度、最高温度数据集,空间分辨率 1km,数据存储格式为.nc.首先将.nc 格式转为栅格.tif 格式,通过裁剪得到长江流域 2000~2020 年逐月降水量和昼夜温度数据集;然后将 4~10 月的逐月最高气温、逐月最低气温运用平均值合成法合成年尺度生长季数据集,将 4~10 月降水量数据累加合成年尺度生长季数据集.

1.2.3 其他数据 其他数据分别为从国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn)获取的长江流域及其二级流域矢量边界数据;从地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)获取的空间分辨率为 90m 的 DEM 数据.2010 年植被覆盖数据来源于资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/),空间分辨率为 1km.根据研究需求将植被覆盖分为栽培植被、林地、灌木林、混合林和草地等 5 类.

1.3 研究方法

1.3.1 线性趋势分析法 本研究运用线性趋势分析法探究长江流域生长季 NDVI、T_{max}、T_{min} 和降水量的变化趋势.趋势β的计算公式为[19]:

$$\beta=\frac{nX_i\sum_{i=1}^{n}i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}X_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-(\sum_{i=1}^{n}i)^2} \quad (1)$$

式中:变量 i 表示年序号,$i\in(1,2,\cdots,n)$;X_i 表示第 i 年生长季 NDVI 值、T_{max}、T_{min} 和降水量;n 为研究序列的长度 21.β>0,表明生长季 NDVI、T_{max}、T_{min} 和降水量呈上升趋势; β<0,表明呈下降趋势.选用 F 检验法对变化趋势的显著性进行检验,当 F(1,19)>4.381 表示通过了 0.05 的显著性检验;当 F(1,19)>8.185 表示通过了 0.01 的显著性检验.

1.3.2 偏相关分析法 为了消除其他气候因子对结果的干扰,采用二阶偏相关分析法逐像元计算 2000~2020 年长江流域生长季 NDVI 与 T_{max}、T_{min} 和降水量之间的偏相关系数[20].例如,计算生长季 NDVI 与 T_{max} 的偏相关系数时控制 T_{min} 和降水量,其他偏相关系数计算方法类似.偏相关系数的显著性采用 t 检验法,其中 P<0.05 表示显著相关,P<0.01 表示极显著相关.

1.3.3 时滞效应分析 已有研究表明[20-22],在月尺度上植被动态对气候因子的时滞一般短于 3 个月.因此,本研究基于二阶偏相关分析方法,逐像元计算了长江流域生长季 NDVI 与前 0~3 个月 T_{max}、T_{min} 和降水量的偏相关系数,然后基于最大值合成法对不同时滞下的偏相关系数进行绝对值最大值合成,得到最大偏相关系数及其对应的滞后期,从而确定生长季 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量的滞后响应时间.计算式为:

$$r_i=\mathrm{corr}(\mathrm{NDVI},X_i) \quad 0\leqslant i\leqslant 3 \quad (2)$$

$$R_{max\text{-}lag}=\max(|r_i|) \quad 0\leqslant i\leqslant 3 \quad (3)$$

式中:变量 r_i 表示滞后 i 个月的偏相关系数,i 的值域为[0,3];NDVI 表示 2000~2020 年逐月 NDVI 时间序列;X_i 代表滞后 i 个月的 T_{max}、T_{mi} 和降水量时间序列;$R_{max\text{-}lag}$ 表示最大时滞偏相关系数,其对应的时间尺度 i 则为滞后时间.

2 结果与分析

2.1 生长季 NDVI 时空变化特征

从时间变化特征来看(图 2),2000~2020 年长江流域生长季 NDVI 呈极显著增加趋势(R^2=0.8379, P<0.01),增加速率为 0.021/10a.2000 年 NDVI 均值最小为 0.705,2020 年达到最大值 0.756,这说明长江流域植被覆盖情况较好.从子流域尺度来看,除太湖流域外,其他流域生长季 NDVI 均呈极显著增加趋势(P<0.01),但增长速率表现出一定差异性.其中, NDVI 增长速率最快的是乌江流域(0.037/10a),最慢的为岷江流域(0.009/10a).从 NDVI 均值变化来看,太湖流域和金沙江流域 NDVI 均值为 0.63,而其他流域 NDVI 均值均大于 0.7.总体来说,除太湖流域外,长江流域及子流域生长季 NDVI 总体呈增加趋势.

从空间分布特征(图 3(a))来看,2000~2020 年长江流域生长季 NDVI 呈现“中部高、东西部低”的空间分布格局.NDVI 低值区主要分布在长江上游的金沙江流域、岷江流域,下游的太湖流域、鄱阳湖流域;高值区主要分布在乌江流域和嘉陵江流域.从空间变化趋势(图 3(b))来看,长江流域生长季 NDVI 在大部分地区均呈上升趋势,面积占比达 84.19%.也有少部分地区 NDVI 呈下降趋势,面积占比为 15.81%,主

要分布在长江下游的太湖流域、汉江流域、洞庭湖流域和鄱阳湖流域,上游的岷江流域.

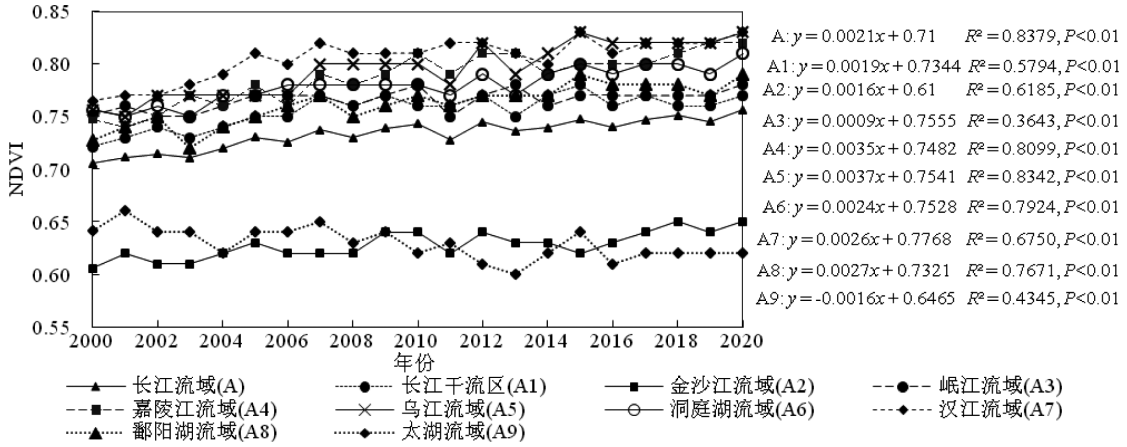


图 2　生长季 NDVI 时间变化特征

Fig.2　Temporal change trend of the NDVI during the growing season

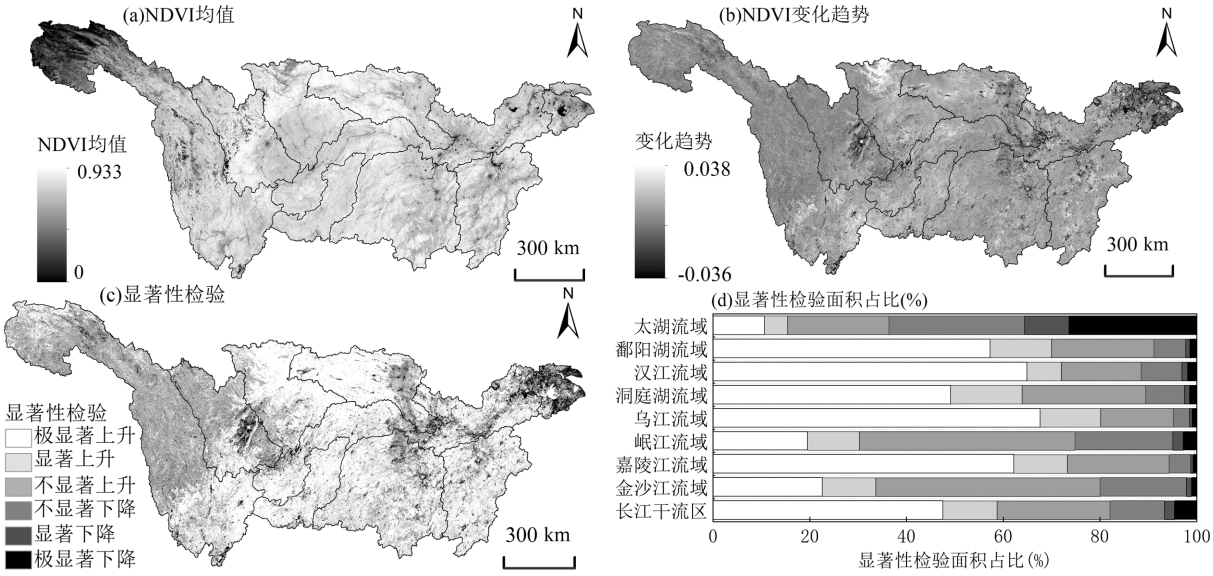


图 3　生长季 NDVI 空间分布及变化特征

Fig.3　Spatial distribution and variation characteristics of the NDVI during the growing season

从变化趋势的显著性(图 3(c))来看,整个流域以极显著和显著上升趋势为主,面积占比为 53.96%,集中分布在乌江流域、洞庭湖流域、汉江流域和嘉陵江流域;呈极显著和显著下降趋势的面积占比为 3.78%,主要分布在长江下游的太湖流域、中游的干流区以及上游的岷江流域,其他流域也有局部分布.从子流域统计数据(图 3(d))来看,除太湖流域外,其他流域生长季 NDVI 呈上升趋势的面积占比均大于 70%,以乌江流域和嘉陵江流域上升趋势最为明显.太湖流域生长季 NDVI 呈下降趋势的面积占比超过 60%,呈显著下降趋势的面积占比超过 20%.总体来说,长江流域生长季植被覆盖呈改善态势,太湖流域植被覆盖退化严重.

2.2　生长季 T_{max}、T_{min} 和降水量时空变化特征

2.2.1　时间变化特征　从图 4(a)可以看出,2000~2020 年长江流域生长季 T_{max} 和 T_{min} 皆呈不同程度的上升趋势.其中,T_{max} 呈不显著波动上升趋势(P>0.05),上升幅度为 0.097℃/10a;2004 年以前增速较缓慢,之后呈波动增加趋势,2006 年增加到峰值 22.48℃,2014 年减少至最低值 21.29℃.对生长季 T_{min} 而言,总体上呈不显著波动上升趋势(P>0.05),上升幅度约为 0.15℃/10a,增速是最高温度的 1.55 倍.这说明长

江流域昼夜增温速率呈现不对称性,且 T_{min} 增温幅度大于 T_{max}.从图 4(b)可以看出,生长季降水量总体呈不显著波动增加趋势(P>0.05),增加速率为 3.61/a,降水量在 2011 年达到最小值,之后呈波动上升趋势.统计分析发现,2000~2011 年降水量均值为 831.74mm,变化率为−4.33/a;2011~2020 年降水量均值为 889.50mm,变化率为 12.07/a;相较于 2000~2011 年,2011 年之后降水量均值增长了 6.49%.

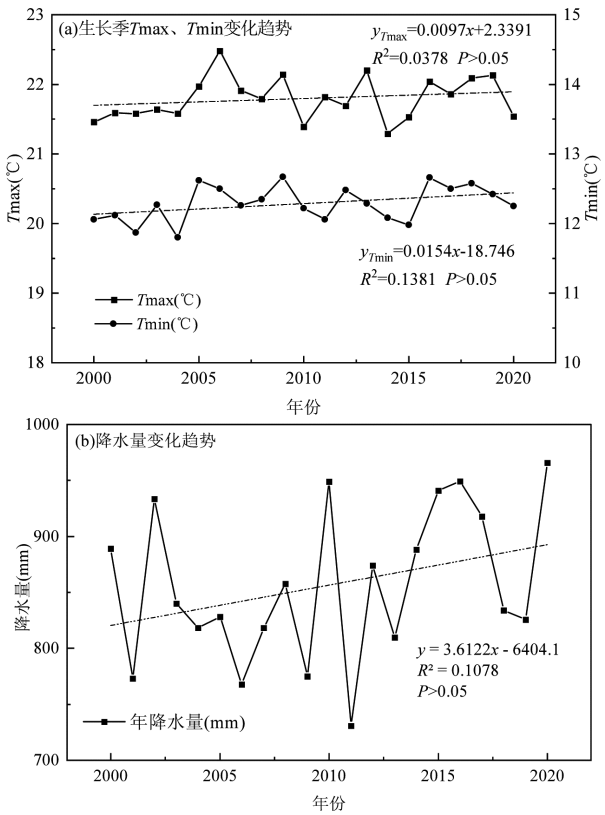


图 4 生长季 T_{max}、T_{min} 和降水量年际变化趋势

Fig.4 Annual variation trends of T_{max}、T_{min} and precipitation in the growing season

从子流域尺度来看(表 1),生长季 T_{max} 在嘉陵江流域呈不显著下降趋势 P>0.05),其他子流域均呈不显著上升趋势(P>0.05),其中金沙江流域上升速率最快(0.21℃/10a),汉江流域上升速率最慢.生长季 T_{min} 在子流域均呈不显著上升趋势(P>0.05),除长江干流区外,其他子流域上升速率均大于 T_{max},说明子流域昼夜增温速率也表现出不对称性,且增温幅度存在较明显差异.生长季降水量在汉江流域呈不显著减少趋势(P>0.05),长江干流区和嘉陵江流域呈显著增加趋势(P<0.05),岷江流域和太湖流域呈极显著增加趋势(P<0.01),其他子流域增加趋势不显著(P>0.05).总体来说,子流域 T_{max} 和 T_{min} 皆以不显著上升趋势占主导,且 T_{min} 的增加速率高于 T_{max},表现出昼夜增温速率不对称性;降水量在不同子流域变化趋势表现出一定差异性.

表 1 子流域生长季 T_{max}、T_{min} 与降水量年际变化特征

Table 1 Interannual variations of T_{max}、T_{min} and precipitation in subbasins

子流域	T_{max}(℃/10a)	T_{min}(℃/10a)	降水量(mm/10a)
长江干流区(A1)	0.051	0.104	74.092*
金沙江流域(A2)	0.210	0.152	1.760
岷江流域(A3)	0.110	0.269	75.511**
嘉陵江流域(A4)	−0.080	0.200	63.632*
乌江流域(A5)	0.117	0.225	86.804
洞庭湖流域(A6)	0.072	0.117	20.225
汉江流域(A7)	0.0002	0.056	−18.922
鄱阳湖流域(A8)	0.121	0.182	38.432
太湖流域(A9)	0.149	0.162	107.560**

注:*,P<0.05显著性;**,P<0.01显著性.

2.2.2 空间变化特征 从图 5(a)可以看出,长江流域生长季 T_{max} 在空间上总体以上升趋势为主,平均变化率为 0.096℃/10a,呈上升趋势的面积占比为 68.61%,主要分布在流域的上游及下游地区;呈下降趋势的面积占比 31.39%,集中分布在嘉陵江流域、汉江流域、长江干流区,其他流域也有部分分布.显著性检验结果(图 5(b))表明,生长季 T_{max} 以不显著变化趋势占主导(84.76%),呈显著变化(P<0.05)的面积仅占 15.24%.其中,呈显著上升(P<0.05)的面积占比为 14.70%,集中分布在上游的金沙江流域和岷江流域;呈显著下降趋势的面积占比仅为 0.54%,主要散布在嘉陵江流域、长江干流区.从子流域统计结果(图 5(c))来看,除嘉陵江流域接近 80%的区域呈下降趋势外,其他流域面积占比大于 60%的区域以上升趋势为主,尤以太湖流域上升趋势占比最大(96.52%),其次为鄱阳湖流域(86.89%).此外,金沙江流域呈显著变化趋势的面积占比最大(34.42%),其次为岷江流域(29.21%)和嘉陵江流域(10.36%).

从图 5(d)可以看出,生长季 T_{min} 在空间上总体以上升趋势为主,平均变化率为 0.15℃/10a,呈上升趋势的面积占比为 78.33%,主要分布在长江中游地区、下游以及源头区;呈下降趋势的面积占比为 21.67%,集中分布在汉江流域、长江干流区、洞庭湖流域以及金沙江流域.显著性检验结果(图 5(e))显示,

生长季 T_{min} 以不显著变化趋势占主导(62.36%),呈显著变化的面积占 37.64%,主要以极显著上升(19.81%)和显著上升(15.18%)为主,在不同流域均有一定分布,尤以岷江流域占比最高(66.26%);呈显著下降趋势的面积占比仅为 2.65%,集中分布在金沙江流域下游地区.从子流域统计结果(图 5(f))来看,除汉江流域上升趋势面积占比为 53%外,其他流域上升趋势面积占比均大于 70%,尤以太湖流域上升趋势面积占比最大(97.35%),其次为鄱阳湖流域和嘉陵江流域,面积占比皆在 90%以上.

相较于生长季温度变化而言,生长季降水量变化趋势在空间上表现出一定差异性.从图 5(g)可以看出,生长季降水量总体以增加趋势占主导(72.02%),平均变化速率为 36.1mm/10a.呈增加趋势的区域主要分布在中游、下游及源头区,而呈减少趋势的区域主要分布在金沙江流域、汉江流域、洞庭湖和鄱阳湖流域.显著性检验结果(图 5(h))表明,生长季降水量主要以不显著变化趋势占主导(78.84%),呈显著变化的面积占比为 21.16%,主要以显著增加(10.84%)和极显著增加(9.13%)为主,主要分布在岷江流域、嘉陵江流域、长江干流区及太湖流域.从子流域统计结果(图 5(i))来看,汉江流域减少趋势面积占比最大(84.84%),其次为金沙江流域(45.90%),其他流域面积占比超过 70%的区域以增加趋势为主,尤以太湖流域显著上升趋势面积占比最大(99.5%),其次为岷江流域(64.18%)和嘉陵江流域(47.17%).

总体来说,长江流域生长季 T_{max}、T_{min} 和降水量均以增加趋势占主导,T_{min} 平均变化率大于 T_{max},不同子流域 T_{min} 显著增加趋势的面积占比均大于 T_{max},表现出昼夜温度变化的不对称性.降水量呈显著增加的区域集中分布在长江上游和下游地区.

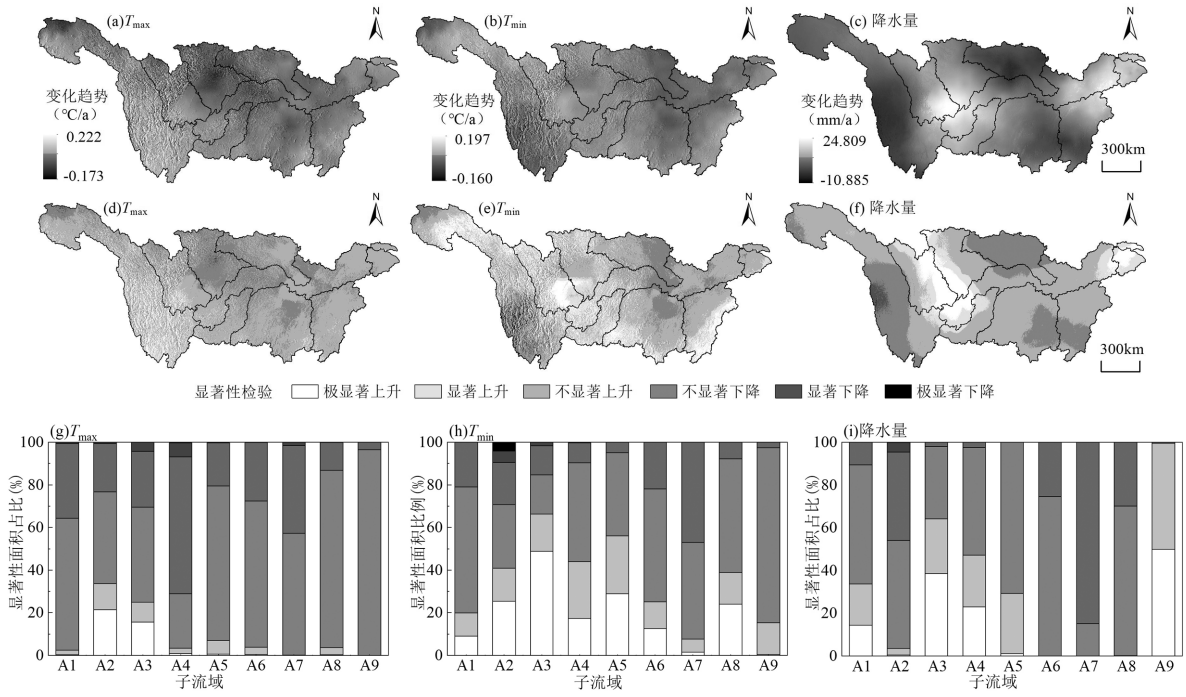


图 5　生长季 T_{max}、T_{min} 和降水量变化趋势空间分布

Fig.5　Spatial distributions of the variation trends of T_{max}、T_{min} and precipitation during the growing season

2.3　生长季 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量的响应

2.3.1　生长季 NDVI 与 T_{max}、T_{min} 和降水量的偏相关分析　从图 6(a)可知,长江流域生长季 NDVI 与 T_{max} 的偏相关系数为−0.85~0.86,在空间上表现出一定的异质性.显著性检验结果表明(图 6(b)),生长季 NDVI 与 T_{max} 以不显著偏相关为主(96.63%);偏相关系数为正的区域约占 46.46%,其中显著正相关(P<0.05)的区域占比为 3.11%;约有 53.54%的区域偏相关系数为负,其中呈显著负相关(P<0.05)的区域占比为 3.26%.从子流域尺度来看(图 6(c)),岷江(66.92%)和金沙江流域(58.45%)以正相关为主,乌江流域正相关(49.16%)与负相关(50.84%)相差不大,其

他流域以负相关为主,尤以嘉陵江流域负相关占比最高(73.38%),其次为汉江流域(73.15%),其他流域负相关占比介于 55%~67%.以上分析表明,T_{max} 对岷江和嘉陵江流域植被生长以轻微促进作用为主,而对其他大部分流域植被生长以轻微抑制作用为主.

对生长季 T_{min} 而言,其与 NDVI 的偏相关系数以正相关占主导(69.66%),负相关的占比约为 30.34%(图 6(d)).显著性检验结果表明(图 6(e)),呈显著正相关(P<0.05)的占比为 10.29%,主要分布在研究区中上游地区;而呈显著负相关(P<0.05)的占比仅为 1.50%.从子流域尺度来看(图 6(f)),除岷江流域呈正相关(49.15%)与负相关(50.85%)的占比基本持平外,其他流域皆以正相关为主(占比大于 55%),尤以嘉陵江流域呈正相关的占比最大(88.02%),其次为乌江流域(87.61%)、汉江流域(81.43%)和洞庭湖流域(81.42%).上述分析表明,T_{min} 对研究区绝大部分子流域植被生长以促进作用为主.

从图 6(g)可知,生长季 NDVI 与降水量以正相关占主导,呈正相关的区域占比约为 68.65%,呈负相关的占比约为 31.35%, 空间上表现出较明显的异质性.显著性检验结果表明(图 6(h)),呈显著正相关(P<0.05)的区域占比为 12.40%,集中分布在研究区上游;而呈显著负相关(P<0.05)的区域占比仅为 1.59%,主要分布在太湖流域.从子流域尺度来看(图 6(i)),除汉江流域和太湖流域外,其他流域约占 60%以上的区域 NDVI 与降水量皆为正相关,尤以乌江流域占比最高(92.08%).上述分析表明,降水量对研究区绝大部分子流域植被生长以促进作用为主.

综上可知,生长季 T_{max} 对植被生长的促进与抑制作用相当,而 T_{min} 和降水量均对植被生长以促进作用为主.植被生长受 T_{max}、T_{min} 和降水量显著影响(P<0.05)的区域占比分别为 6.37%、11.79%和 13.99%.说明生长季 T_{min} 和降水量对植被生长的影响区域更为广泛,且 T_{min} 对植被生长的影响比 T_{max} 明显.

从图 7(d)可知,生长季 NDVI 对 T_{max} 的平均滞后响应时间为 1.6 个月,滞后期为 0 个月、1 个月、2 个月和 3 个月的区域占比分别为 25.27%、20.86%、21.17%和 32.70%;其中,滞后期为 3 个月的区域集中分布在研究区上游北部,其他滞后时间在研究区均有一定分布.从子流域统计数据来看(图 7(g)),嘉陵江流域以 3 个月滞后期为主(62.31%),其次为汉江流域(48.23%)和乌江流域(40.89%),太湖流域以 0 个月滞后期占比最大(36.97%),其他流域不同滞后期均有一定分布.对生长季 T_{min} 而言,NDVI 对其平均滞后响应时间为 1.3 个月,以 0~1 个月的滞后期为主导,其中滞后期为 0 个月的区域占比最大(30.23%),在研究区广泛分布;滞后期为 1 个月的区域占比为 28.97%,主要分布在研究区中部、西部及东南部地区.从子流域统计数据来看(图 7(h)),乌江流域以 0 个月滞后期占比最大(43.46%),汉江流域和嘉陵江流域以 1 个月滞后期占比最大,分别为 39.93%和 39.06%,其他流域不同滞后期均有一定分布.此外,从图 7(f)可以看出,生长季 NDVI 对降水量的平均滞后响应时间为 1.4 个月,滞后期为 0 个月、1 个月、2 个月和 3 个月的占比分别为 30.11%、20.01%、23.27%和 26.61%,其中上游南部以滞后期 0 个月为主、东西部以滞后期 2 个月为主,北部以滞后期 3 个月为主,滞后期为 1 个月的分布区较为广泛.从子流域统计数据来看(图 7(i)),乌江流域以 0 个月滞后期为主导(65.69%),嘉陵江流域以 3 个月滞后期占比最高(53.05%),其他流域不同滞后期均有一定分布.

综上可知,长江流域生长季植被受前 0~3 月 T_{min} 和降水量的影响大于 T_{max},这说明生长季 T_{max} 的升高会抑制植被生长,而 T_{min} 升高以及降水量的增加对植被生长有积极促进作用.生长季植被对 T_{min} 的滞后响应时间最短(1.3 个月),其次为降水量(1.4 个月)和 T_{max}(1.6 个月).除太湖流域外,其他流域植被对 T_{min} 的滞后响应时间为 0~1 月的区域占比高于 T_{max},这说明生长季植被对 T_{min} 的响应比 T_{max} 更为敏感.

2.3.2 不同植被 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量响应的差异性 生长季不同植被 NDVI 与 T_{max}、T_{min} 和降水量的偏相关系数存在一定差异性(图 8),T_{min} 和降水量对植被生长的促进作用较白天 T_{max} 明显,这说明生长季不同植被对昼夜不对称增温及降水量响应存在差异,这与不同植被的生物学特性存在差异有关[11].从图 8(a)可以看出,不同植被 NDVI 与 T_{max} 的偏相关系数为−0.05~0.02,未通过 P<0.05 显著性检验,说明生长季 T_{max} 对不同类型植被的影响并不明显,对林地、灌木林和草地生长有轻微促进作用,而对其他植被生长有轻微抑制作用.对生长季 T_{min} 而言,其与不同植被 NDVI 的偏相关系数介于 0.11~0.18 之间,呈不显著正相关(P>0.05),说明生长季 T_{min} 对研究区所有植被都

有轻微促进作用.不同植被生长受 T_{min} 的影响皆强于 T_{max}.从图 8(b)可以看出,生长季降水量与不同植被 NDVI 的偏相关系数均为正值,在 0.12~0.18 之间波动,未通过 $P<0.05$ 显著性检验,说明生长季降水量对植被生长起到轻微促进作用,对灌木林和草地的生长促进作用较明显.

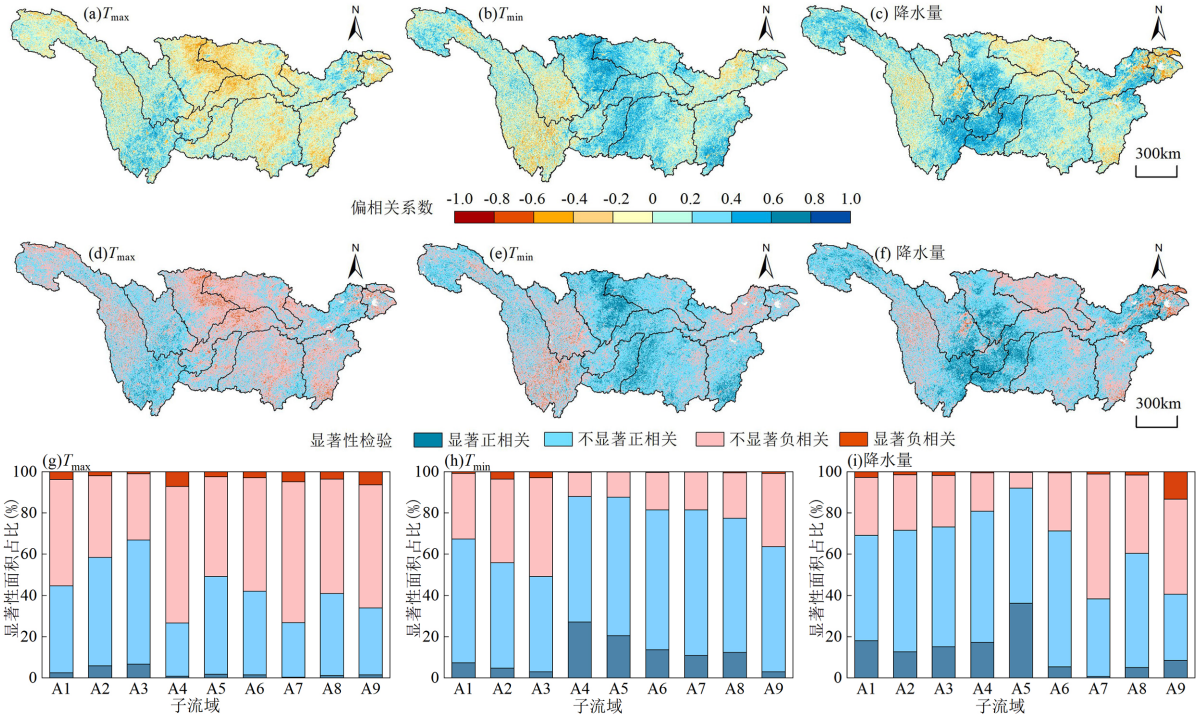


图 6　生长季 NDVI 与 T_{max}、T_{min} 和降水量偏相关系数

Fig.6　Partial correlation coefficients between the NDVI and T_{max}、T_{min} and precipitation during the growing season

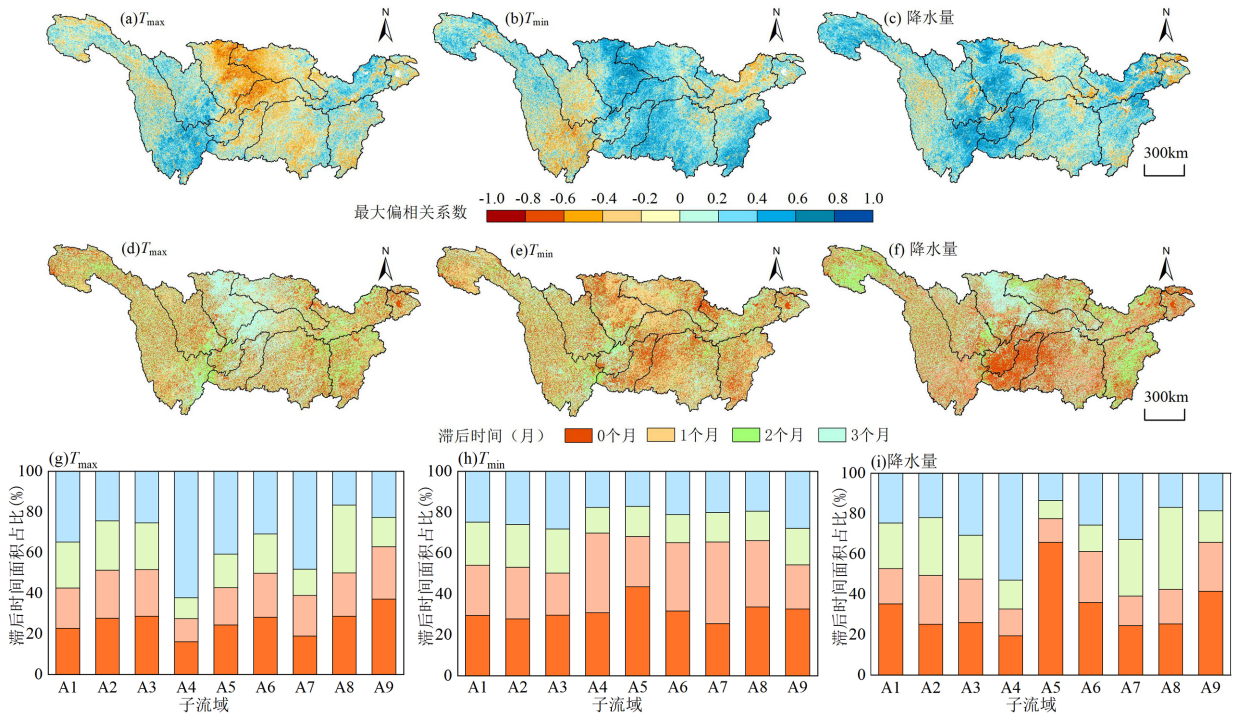


图 7　生长季 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量的最大偏相关系数时滞效应

Fig.7　Maximum partial correlation coefficients and lag times of the responses of the NDVI to T_{max}、T_{min} and precipitation during the growing season

从图 8(c)可以看出,不同植被 NDVI 对 T_{max} 的平均滞后响应时间介于 1.55~1.72 个月之间,但具体响应时间具有一定差异性,滞后响应时间从大到小依次为:混合林>栽培植被>灌木林>草地>林地,表明混合林对 T_{max} 的滞后响应时间最长,而林地的滞后响应时间最短.对 T_{min} 来说,不同植被 NDVI 对其平均滞后响应时间介于 1.25~1.38 个月之间,滞后响应时长从大到小依次为:草地>栽培植被>林地>灌木林>混合林,表明长江流域草地对 T_{min} 的滞后响应时间最长,而混合林的滞后响应时间最短.不同类型植被 NDVI 对 T_{max} 的平均滞后时间均大于 T_{min},说明不同植被生长对 T_{min} 的敏感性高于 T_{max}.

从图 8(d)可以看出,不同植被 NDVI 对降水量的响应时间也有一定差异,平均滞后时长介于 1.33~1.57 个月之间,滞后响应时长从大到小依次为:草地>栽培植被>混合林>林地>灌木林,表明草地对降水量的滞后响应时间最长,而灌木林滞后响应时间最短.

总体来说,长江流域不同植被NDVI对 T_{min} 的平均滞后响应时间最短,其次为降水量和 T_{max},这说明不同植被生长对 T_{min} 的响应最为敏感.

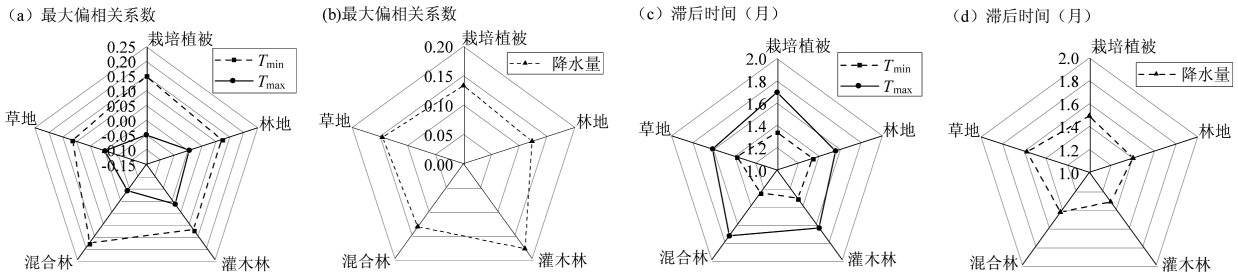


图 8 不同植被 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量的偏相关系数及滞后时间

Fig.8 Partial correlation coefficients and lag times of the responses of the NDVI to T_{max}、T_{min} and precipitation among different vegetation type

3 讨论

3.1 生长季 NDVI 时空变化特征

本研究显示,2000~2020 年长江流域生长季 NDVI 呈极显著上升趋势,除太湖流域 NDVI 以下降趋势为主,其余子流域 NDVI 均呈极显著上升趋势,尤以乌江和嘉陵江流域上升速率最快,这与已有的研究结果一致[18,23-24].空间上,NDVI 变化趋势表现出较明显的异质性,呈极显著上升趋势的区域主要分布在乌江、汉江、嘉陵江、鄱阳湖、洞庭湖流域以及长江干流区,这些地区植被覆盖改善最为明显.这主要得益于 2000 年以来国家及地方政府实施的各种生态修复工程,如天然林保护工程,退耕还林还草工程、喀斯特石漠化治理工程,长江流域防护林体系建设工程等,减缓了水土流失、遏制了石漠化进程、提高了森林水源涵养能力,改善了植被生长发育的环境条件,积极促进了植被覆盖的增加[25-29].NDVI 呈显著减少的区域集中分布在下游的太湖流域、上游岷江流域及长江干流下游地区,这些地区主要位于成渝城市群、长江中游城市群和长三角城市群,由于经济发展较快、城市化进程加快,建设用地规模扩张,从而导致植被破坏严重,植被覆盖程度降低,植被退化趋势明显,这与已有的研究结论相符[29-31].

3.2 生长季 T_{max}、T_{min} 和降水量时空变化特征

已有研究表明,过去 50a 全球昼夜增温表现出不对称性,T_{min} 的增加速率约为 T_{max} 增加速率的 1.4 倍[32].本研究结果亦显示,2000~2020 年长江流域生长季 T_{min} 增加速率约为 T_{max} 增加速率的 1.55 倍,昼夜增温表现出明显的不对称性,此结论在其他研究中也得到了证实[5-6,15,33].这说明长江流域生长季与全球变暖趋势一致.对生长季降水量来说,其变化趋势表现出明显的阶段性,2011 年前呈波动减少趋势,之后呈波动增加趋势,此结论与 Yin 等[31]研究得到的结论相符.这可能与 2011 年春季长江中下游地区因大气环流异常遭遇了 50a 一遇的干旱事件有关.空间上,T_{max}、T_{min} 与降水量变化趋势总体以上升趋势占主导,说明研究区有暖湿化趋势,但存在一定的空间异质性,这可能与研究区的海拔,植被覆盖类型、海陆位置等因素有关[11],

也可能与东亚季风的多年代际变化、城市化的快速发展有关[33,35].

3.3　生长季 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量的响应

本研究显示,长江流域生长季 T_{max} 对岷江流域、金沙江流域的植被生长以促进作用为主,这些地区海拔高、地形起伏大,以草地和林地为主,植被生长主要受温度限制,白天增温有益于提高光合酶活性,增加土壤氮矿化和有效性,从而促进植被光合作用,提高植被生产力[6,36-38];而 T_{max} 的上升对嘉陵江流域和汉江流域植被生长以抑制作用为主,这些地区主要分布林地,植被生长不受水分限制,T_{max} 的升高会加速植被的蒸发,降低土壤湿度,从而加剧干旱风险,对植被生长产生消极影响,植被会采取适应策略来应对此恶劣环境[7,39].生长季 T_{min} 对植被生长的促进范围更广,除金沙江流域和岷江流域外,对其他地区植被生长均以促进作用为主,这可能与夜间温度的升高可以降低霜冻出现的频率,从而促进植物的生长和生产力的提升有关[11];也可能是夜间温度升高增强植物自养呼吸而产生的补偿效应,从而提升白天的光合作用效率,促进植被生产力的提升[7,15,37];同时,夜间最低温的升高可增强植物呼吸作用和体内养分代谢速率,造成植物体内有机物损耗,从而抑制植被生长[40-41].不同植被类型对生长季 T_{max} 和 T_{min} 响应具有差异性,总体对 T_{min} 的敏感性高于 T_{max}.这可能与昼夜温度对植被的作用机理不同有关,同时也与不同植被类型的生态生理响应差异有关[6].

生长季降水量对金沙江上游的长江源区、岷江上游及嘉陵江上游地区植被生长促进作用明显,这些地区海拔高,地形起伏大,植被以高寒草地和针叶林为主,这些地区降水量和土壤湿度相对较低,生长季降水量的增加能缓解缺水对植被生长的限制,从而改善植被生长条件[42],此外生长季降水量增加能增加土壤湿度,促进土壤无机氮可利用性,从而对植被生长起到积极影响[43].此外,金沙江流域下游、长江干流上流以及乌江流域数据属于西南喀斯特地区,地表土壤保水能力差,植被类型以林地为主,干旱频发,植被生长受水分影响较明显;而四川盆地主要为栽培植被分布区,植被生长对水分需求较大,但降水量偏少,经常发生火灾及干旱;因而以上区域生长季降水量的增加可以满足植被生长发育所需降水量,从而对植被的生长发育有积极促进作用[44-45].生长季降水量的增加对汉江上游地区及太湖流域植被生长有一定抑制作用.这与汉江上游位于秦岭、大巴山地区,植被以草地、林地和栽培植被为主,由于山脉的阻隔作用,植被生长对降水量不敏感性;而太湖流域内河网密布、湖泊众多,水资源丰富,栽培植被受水分限制不明显,降水量的增加可能导致土壤水分饱和、根部缺氧,抑制植物生长[46].

本研究显示,生长季 NDVI 对 T_{min}、降水量和 T_{max} 的响应均表现出一定的滞后效应,且滞后时间存在空间异质性,平均滞后时间分别为 1.3 个月、1.4 个月和 1.6 个月.除太湖流域外,其他流域 NDVI 对 T_{min} 的滞后响应时间为 0~1 月的区域占比高于 T_{max},这说明生长季植被对 T_{min} 的响应比 T_{max} 更为敏感.这说明生长季前期升温有利于积累热量加速冻土、积雪融化,增加土壤含水量,对生长季初期植物萌发及进行光合作用有积极促进作用;在生长季中期植被对前期降水量变化敏感,此时热量充足,降水量的增加有助于植被生长;而生长季后期植被对前期降水量及 T_{min} 变化敏感,这可能是在生长期末期前 T_{min} 的升高会增强植物光合作用,同时提升水分需求,进而推迟植物枯黄期[47].

3.4　研究的局限性

本研究揭示了长江流域及其子流域生长季昼夜不对称增温及降水量对植被的影响,但仍存在一些问题.首先,本研究仅探讨了生长季昼夜增温及降水量对植被影响的差异性,未能考虑昼夜增温及降水量对植被影响的季节差异[11,47].另一方面,本研究仅明晰了植被对昼夜增温的时滞效应,未进一步探究植被对昼夜增温的累积效应及时滞-累积综合效应.已有研究指出植被对气候的响应表现出时滞和累积效应[20],且相关研究已经证实昼夜累积增温也存在不对称性,其对植被的影响也表现出空间异质性[16,48].此外,植被对气候的响应不仅受地形、土壤环境的影响,还受人类活动的干扰[49].因此,在后续研究中将进一步探讨长江流域昼夜增温及降水量的季节演变特征,揭示植被对昼夜增温和降水量的累积效应和时滞-累积综合效应,并量化气候变化(昼夜增温及降水量)和人类活动对植被变化的相对贡献.

4 结论

4.1 时间尺度上,2000~2020 年长江流域生长季 NDVI 呈波动上升趋势,除太湖流域外,其他流域 NDVI 均呈上升趋势,乌江流域 NDVI 增长速率最快.空间上,生长季 NDVI 表现为中部高,东西两翼低的分布格局,NDVI 呈增加趋势的区域占比为 84.19%,除太湖流域外,其余子流域 NDVI 均呈增加趋势,乌江流域 NDVI 增加趋势最为明显.

4.2 时间尺度上,2000~2020 年长江流域生长季 T_{max}、T_{min} 和降水量均呈不显著上升趋势,且 T_{min} 的增加速率约为 T_{max} 的 1.55 倍,昼夜增温速率表现出不对称性.除嘉陵江和汉江流域外,其他子流域 T_{max}、T_{min} 和降水量均呈增加趋势.空间上,生长季 T_{max}、T_{min} 和降水量呈增加趋势的区域占比介于 68%~ 79%之间,以太湖和乌江流域增加趋势最为明显.

4.3 偏相关分析结果表明,生长季 NDVI 与 T_{max}、T_{min} 和降水量的偏相关系数基本以正值为主,T_{max} 对植被生长的促进(46.46%)及抑制(53.54%)区域相当,而 T_{min}(69.66%)和降水量(68.65%)对植被生长起促进作用范围更广.生长季 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量的平均滞后响应时间分别为 1.6 个月、1.3 个月和 1.4 个月;不同子流域及不同植被类型 NDVI 对 T_{max}、T_{min} 和降水量的响应有一定差异.

参考文献:

[1] Piao S L, Wang X H, Park T. et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020,1(1):14-27.

[2] Cui L F, Wang Z D, Deng L H, et al. Vegetation dynamics and their relations with climate change at seasonal scales in the Yangtze River Basin, China [J]. Applied Ecology & Environmental Research, 2020, 18(2):3543-3556.

[3] 孙 颖.人类活动对气候系统的影响－解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章 [J]. 大气科学学报, 2021,44(5):654-657.
Sun Y. Impact of humanactivities on climate system: an interpretation of Chapter Ⅲ of WG Ⅰ report of IPCC AR6 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021,44(5):654-657.

[4] Vose R S, Easterling D R, Gleason B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: an update through 2004 [J]. Geophys, 2005,32(23):L23822.

[5] Davy R, Esau I, Chernokulsky A, et al. Diurnal asymmetry to the observed global warming [J]. International Journal of Climatology, 2017,37(1):79-93.

[6] Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on northern hemisphere vegetation [J]. Nature, 2013,501:88-94.

[7] Wan S Q, Xia J Y, Liu W X, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration [J]. Ecology, 2009,90(10):2700-2710.

[8] Zheng Z T, Zhang Y J, Zhu J T, et al. Daytime temperature contributes more than nighttime temperature to the weakened relationship between climate warming and vegetation growth in the extratropical northern hemisphere [J]. Ecological Indicators, 2021,131:108203.

[9] Zhu G F, Wang X F, Xiao J F, et al. Daytime and nighttime warming has no opposite effects on vegetation phenology and productivity in the northern hemisphere [J]. Science of the Total Environment, 2022, 822:153386.

[10] 赵 杰,杜自强,张 红,等.中国季节性昼夜增温的不对称性及其对植被活动的影响 [J]. 生态学报, 2018,38(11):3909-3919.
Zhao J, Du Z Q, Zhang H, et al. Asymmetric seasonal variability in day-and night-time warming and their effects on vegetation activity in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(11):3909-3919.

[11] 赵 杰,刘雪佳,杜自强,等.昼夜增温速率的不对称性对新疆地区植被动态的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(6):2316-2321.
Zhao J, Liu X J, Du Z Q, et al. Effects of the asymmetric diurnal-warming on vegetation dynamics in Xinjiang [J]. China Environmental Science, 2017,37(6):2316-2321.

[12] Xu B N, Li J J, Pei X J, et al. Decoupling the response of vegetation dynamics to asymmetric warming over the Qinghai-Tibet plateau from 2001 to 2020 [J]. Journal of Environmental Management, 2023,347: 119131.

[13] 李 理,刘俊杰,赵 芳,等.昼夜不对称性增温对秦巴山地植被 NDVI 的影响研究 [J]. 地域研究与开发, 2023,42(1):161-166,173.
Li L, Liu J J, Zhao F, et al. Effects of day and night asymmetric warming on different vegetation types in Qinling-Daba Mountains [J]. Areal Research and Development, 2023,42(1):161-166,173.

[14] Wang Y J, Shen X J, Jiang M, et al. Daytime and nighttime temperatures exert different effects on vegetation net primary productivity of marshes in the western Songnen plain [J]. Ecological Indicators, 2022,137:108789.

[15] 李忠良,何光鑫,李 勋.高寒气候区生长季 NDVI 与昼夜不对称增温的 Copula 分析 [J]. 大气科学学报, 2024,47(3):407-424.
Li Z L, He G X, Li X. Copula analysis of NDVI and diurnal-nocturnal asymmetric warming during the growing season in typical plateau climatic region [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024,47(3): 407-424.

[16] Wen Y Y, Liu X P, Pei F S, et al. Non-uniform time-lag effects of terrestrial vegetation responses to asymmetric warming [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018,252:130-143.

[17] 崔利芳,王伦澈,屈 赛,等.气温、降水量和人类活动对长江流域植

被 NDVI 的影响 [J]. 地球科学, 2020,45(6):1905−1917.
Cui L F, Wang L C, Qu S, et al. Impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI in Yangtze River Basin, China [J]. Earth Science, 2020,45(6):1905−1917.

[18] Zhang W, Wang L C, Xiang F F, et al. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 110:105892.

[19] Stow D A, Hope A, McGuire D, et al. Remote sensing of vegetation and land−cover change in arctic tundra ecosystems [J]. Remote Sensing of Environment, 2004,89(3):281−308.

[20] 王永锋,靖娟利,刘海红,等.顾及时滞和累积效应的西南喀斯特地区植被变化归因分析 [J]. 环境科学, 2025,46(7):4382−4391.
Wang Y F, Jing J L, Liu H H, et al. Attribution analysis of vegetation variation in the karst region of southwest China considering time lag and accumulation effects [J]. Environmental Science, 2025,46(7): 4382−4391.

[21] 易　浪,孙　颖,尹少华,等.2000~2019 年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2023,43(2):798−811.
Yi L, Sun Y, Yin S H, et al. Spatial−temporal variations of vegetation coverage and its driving factors in the Yangtze River Basin from 2000 to 2019 [J] Acta Ecologica Sinica, 2023,43(2):798−811.

[22] Ding Y X, Li Z, Peng S Z. Global analysis of time−lag and accumulation effects of climate on vegetation growth [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020,92: 102179.

[23] Ma M Y, Wang Q M, Liu R, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage change in northern China considering extreme climate and time−lag and accumulation effects [J]. Science of the Total Environment, 2023,860:160527.

[24] 崔浩楠,罗海江,张学珍.1982~2019 年长江经济带植被覆盖变化的时空特征 [J]. 生态学杂志, 2021,40(8):2517−2529.
Cui H N, Luo H H, Zhang X Z. Temporal and spatial characteristics of green vegetation cover changes in the Yangtze River Economic Belt from 1982 to 2019 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(8):2517−2529.

[25] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain−for−Green areas in Northern Shaanxi, China [J]. Ecological Indicators, 2014,43:103−113.

[26] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long−term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017,54:105−113.

[27] Qu S, Wang L C, Lin A W, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River Basin, China: Climate change or anthropogenic factors? [J]. Ecological Indicators, 2018,90:438−450.

[28] 覃庆锋,陈　晨,曾宪芷,等.长江流域防护林体系工程建设 30 年回顾与展望 [J]. 中国水土保持科学, 2018,16(5):145−152.
Qin Q F, Chen C, Zeng X Z, et al. Review and prospect of protection forest system construction in the Yangtze River Basin in the past 30 years [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(5):145−152.

[29] Chen S S, Wen Z F, Zhang S L, et al. Effects of long−term and large−scale ecology projects on forest dynamics in Yangtze River Basin, China [J]. Forest Ecology and Management, 2021,496:119463.

[30] 张　亮,丁明军,张华敏,等.1982~2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析 [J]. 自然资源学报, 2018,33(12):2084−2097.
Zhang L, Ding M J, Zhang H M, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982~2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(12):2084−2097.

[31] Yin J, Yao M Z, Yuan Z, et al. Spatial−temporal variations in vegetation and their responses to climatic and anthropogenic factors in upper reaches of the Yangtze River during 2000 to 2019 [J]. Watershed Ecology and the Environment, 2023,5:114–124.

[32] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007−the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge university press, 2007.

[33] Yu LX, Liu Y, Yan FQ, et al. Vegetation−induced asymmetric diurnal land surface temperatures changes across global climate zones [J]. Science of the Total Environment, 2023,896:165255.

[34] Zhang S Q, Ren G Y, Zheng X, et al. Changes in the mean and extreme temperature in the Yangtze River Basin over the past 120 years [J]. Weather and Climate Extremes, 2023,40:100557.

[35] Zhang S Q, Ren G Y, Ren Y Y, et al. Linkage of extreme temperature change with atmospheric and locally anthropogenic factors in China mainland [J]. Atmospheric research, 2022,277:106307.

[36] Ma L Q, Xia H M, Meng Q M. Spatiotemporal variability of asymmetric daytime and night−time warming and its effects on vegetation in the Yellow River Basin from 1982 to 2015 [J]. Sensors, 2019,19:1832.

[37] Turnbull M H, Murthy R, Griffin K L. The relative impacts of day−time and night−time warming on photosynthetic capacity in Populus deltoides [J]. Plant Cell Environ, 2002,25:1729–1737.

[38] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon−cycle feedbacks to the climate system [J]. Science, 2022,298: 2173–2176.

[39] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,等.植被活动对气候变化的响应过程研究进展 [J]. 生态学报, 2018,38(6):2229−2238.
Jiao K W, Gao J B, Wu S H, et al. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):2229−2238.

[40] 梁春玲,于泉洲,刘煜杰,等.昼夜增温对南四湖湿地植被 NDVI 的影响差异 [J]. 热带地理, 2015,35(3):422−426,436.
Liang C L, Yu Q Z, Liu Y J, et al. Effects of air temperature circadian on the NDVI of Nansi Lake wetland vegetation [J]. Tropical Geography, 2015,35(3):422−426,436.

[41] Su H X, Feng J C, Axmacher J C, et al. Asymmetric warming significantly affects net primary production, but not ecosystem carbon

balances of forest and grassland ecosystems in northern China [J]. Scientific Reports, 2015,5:9115.

[42] 王逸玮,赵 林,刘广岳,等.青藏高原沱沱河源多年冻土区 NDVI 时空变化及影响因素分析 [J]. 冰川冻土, 2024,46(4):1386-1402.
Wang Y W, Zhao L, Liu G Y, et al. Analysis of spatiotemporal changes and influencing factors of NDVI in the permafrost area of the Tuotuo River source area on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024,46(4):1386-1402.

[43] 武丹丹,井 新,林 笠,等.青藏高原高寒草甸土壤无机氮对增温和降水改变的响应 [J]. 北京大学学报:自然科学版, 2016,52(5):959-966.
Wu D D, Jing X, Lin L, et al. Responses of soil inorganic nitrogen to warming and altered precipitationin an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016,52(5):959-966.

[44] Ding Y, Xu J, Wang X, et al. Spatial and temporal effects of drought on Chinese vegetation under different coverage levels. Science of the Total Environment, 2020,716:137166.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137166.

[45] 马炳鑫,和彩霞,靖娟利,等.1982~2019 年中国西南地区植被变化归因研究 [J]. 地理学报, 2023,78(3):714-728.
Ma B X, He C X, Jing J L, et al. Attribution of vegetation dynamics in Southwest China from 1982 to 2019 [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(3):714-728.

[46] 徐 勇,盘钰春,邹 滨,等.定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPPGS 变化的影响 [J]. 环境科学, 2024,45(3):1615-1628.
Xu Y, Pan Y C, Zou B, et al. Quantitative assessment of the impact of climate change on the growing season of vegetation gross primary productivity in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Environmental Science, 2024,45(3):1615-1628.

[47] 张峰源,苏远航,刘滨辉.东北森林生长季 NDVI 对昼夜不对称增温及降水变化的响应特征 [J]. 北京林业大学学报, 2023,45(2):34-48.
Zhang F Y, Su Y H, Liu B H. Response characteristics of NDVI to asymmetric diurnal temperature increase and precipitation changes during the forest growing season in Northeast China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(2):34-48.

[48] 张钧泳,丁建丽,黄 帅,等.新疆自然植被对非对称性昼夜增温的时滞响应 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):392-400.
Zhang J Y, Ding J L, Huang S, et al. Time lags responses of terrestrial natural vegetation to asymmetric diurnal warming in Xinjiang [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):392-400.

[49] Wu Z J, Yao F M, Ahmad A, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of kNDVI in different sections of the Yangtze River Basin using multiple statistical methods and the PLSPM model [J]. Remote Sensing. 2025,17:299.

作者简介：靖娟利(1977-),女,陕西长安人,教授,硕士,主要研究方向为植被覆盖变化及其气候响应.发表论文 50 余篇.2003080@glut.edu.cn.