

中国生态脆弱区叶面积指数变化的 主导气象因子研究

孙康慧^{1,2,3}, 曾晓东^{1,4,5}, 李芳¹

(1. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029; 2. 江西省气象台, 南昌 330096; 3. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 开展气候变化背景下中国生态脆弱区叶面积指数(LAI)变化的主导气象因子研究, 对揭示该区陆地生态系统的变化规律和生态系统对气候变化的动态响应具有重要意义, 并为生态恢复建设提供科学依据。基于CN0 5.1气象数据和全球陆表特征参量(GLASS)LAI产品, 利用主成分分析方法研究了中国生态脆弱区1982—2017年LAI的变化特征及其主导气象因子。结果显示: 1982—2017年, 中国生态脆弱区气温基本呈上升趋势, 而降水趋势的区域差异显著。大部分生态脆弱区LAI呈增长趋势, 包括干旱半干旱、黄土高原、青藏高原和西南岩溶山地石漠化脆弱区大部, 以及北方农牧林草脆弱区西部和东南部、南方农牧脆弱区北部和东南部。中国生态脆弱区LAI增长的主导气象因子是气温, 其中生态脆弱区大部LAI增长的主导气象因子是日平均气温, 而干旱半干旱脆弱区西部和南方农牧脆弱区LAI增长的主导气象因子分别是日最低和最高气温。研究表明, 在研究时段升温对我国生态脆弱区植被生长有积极影响, 但在一些区域受湿度状况调制。

关键词: 叶面积指数; 主导气象因子; 气候变化; 生态脆弱区; 中国

生态脆弱区一般是两种或两种以上不同类型生态系统的交错区, 其环境与生物因子同时处于相变的临界状态, 生态系统对气候变化敏感、时空波动性强。中国生态脆弱区具有分布面积大、脆弱生态类型多、生态脆弱性表现明显的典型特征^[1]。

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是指单位陆地表面上的绿叶面积大小, 它是生态系统的—一个重要结构参数^[2], 对植被—陆表—大气间的物质和能量交换有重要影响, 被视为反映全球变化的基本气候变量(Essential Climate Variables)之一^[3,4]。生态脆弱区(如干旱半干旱脆弱区)LAI较低, 季节及年际变化相对较大。目前国际上已有多种基于卫星遥感的全球LAI产品。基于LAI遥感产品, 认识中国生态脆弱区生态系统变化及其对气候变化的响应, 揭示全球气候变化对生态系统脆弱性的影响, 评估和预测生态脆弱区的生态环境风险, 是生态系统与全球变化科学研究的前沿科学问题, 并可服务于我国应对全球变化和生态文明建设的重大科技需求^[5]。

—般认为, 气温、降水和相对湿度等气象要素与植物光合作用、呼吸作用与蒸腾作

收稿日期: 2019-12-11; 修订日期: 2020-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604804); 国家自然科学基金项目(41575109, 41475099)

作者简介: 孙康慧(1994-), 女, 河南周口人, 硕士, 研究方向为气候变化与生态变化。

E-mail: Skanghui@outlook.com

通讯作者: 曾晓东(1969-), 男, 北京人, 博士, 研究员, 研究方向为植被生态动力学模式、全球变化中的植被大气相互作用。E-mail: xdzeng@mail.iap.ac.cn

用等生态过程密切相关,是陆地生态系统的主要驱动因子。通过促进植物光合作用,延长生长季,气温升高可以促进植物生长^[6]。而非湿润地区植物的光合作用严重受降水和相对湿度限制^[7]。相对湿度反映了植物的供水压力,随着植物生长的湿度环境变化,其与水分流失调控有关的性状也会发生改变,特别是表皮和气孔特性。植物气孔将在相对湿度较低时关闭,光合效率也随之下降^[8,9],但植物气孔对相对湿度响应的具体机制仍不清楚。

20世纪80年代以来,中国生态脆弱区气候变化显著,气温显著上升,降水区域和年代际变化明显,而相对湿度多呈下降趋势^[10-13]。已有研究表明,中国脆弱生态系统变化的主导气象因子时空差异较大。例如,在森林区,植被变化与温度的相关性较强;而在荒漠区和草原区,植被变化受降水影响更明显^[14]。对同时期北方林草脆弱区归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的研究结论与此一致,即气温是森林区植被变化的主导气象因子,降水是典型草原区和森林草原区植被变化的主导气象因子^[15]。而1982—2003年东北地区夏季NDVI变化总体不明显,气温(或降水)对不同类型植被的影响差异不大,但气温对同一植被的影响高于降水^[16]。但在青藏高原脆弱区,1982—2000年LAI增长的主要气象影响因子是降水,而升温有助于该区气候变得更湿润,更适合植物生长^[17]。

以往研究多针对单个生态脆弱区,难以全面把握中国生态脆弱区植被变化与气候变化的关系。一般利用区域直接平均或空间逐点计算的方法研究植被特征的历史变化,从而难以准确把握区域植被变化的核心特征及其影响因子。一般直接使用回归或相关统计^[17,18],或者模式模拟的方法^[19,20]研究植被变化的影响因子,这两种方式各有利弊。直接相关统计的方法简单易行,但所得结果包含植被所有的变化信息,植被的趋势变化和年际变化难以区分,而植被对环境因子的响应是非线性的,植被趋势变化和年际变化的影响因子可能不同^[17,21]。而模式模拟的方法,虽然解决了非线性问题,但由于模式结构和参数复杂多变,不同模式的模拟结果出入较大,研究结果的不确定性较大^[19]。

本文利用1982—2017年中国6个典型生态脆弱区(干旱半干旱、黄土高原、北方农牧林草、青藏高原、南方农牧和西南岩溶山地石漠化脆弱区)的LAI和气象数据,使用主成分分析(PCA)^[22]方法,选取各生态脆弱区代表性较好的LAI主成分(PCs),提取LAI的核心变化特征并对LAI的趋势变化和年际变化进行区分;结合每个生态脆弱区PCs与LAI之间的相关系数、PCs与各气象要素之间的相关系数以及PCs和气象要素的变化特征,分析得出影响该区LAI变化的主导气象因子;最后,归纳总结近几十年来中国生态脆弱区LAI变化的主导气象因子。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

参考《全国生态脆弱区保护规划纲要》^[1]及其他文献对中国生态脆弱区的定义,“全球变化及应对”重点专项项目“全球变化对生态脆弱区资源环境承载力的影响研究”^[5],将我国生态脆弱区进行划分。由于其中北方农牧脆弱区和北方林草脆弱区存在较大重叠,本文将其合并为北方农牧林草脆弱区。最终将中国生态脆弱区划分为干旱半干旱、黄土高原、北方农牧林草、青藏高原、南方农牧和西南岩溶山地石漠化脆弱区6个典型脆弱区,如图1所示。

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据

研究使用CN0.5.1格点化观测数据集^[23]月平均的日平均、日最高和最低气温、月平均降水和相对湿度，资料空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，根据中国气象局2400多个气象站点（包括国家基准气候站、国家基本气象站和国家一般气象站）的观测数据，利用“距平逼近”的插值方法得到。

1.2.2 LAI数据

研究使用全球陆表特征参量（Global Land Surface Satellite, GLASS）LAI产品^[2]的最新版本（第四版）GLASS AVHRR LAI，其空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ，时间分辨率为8天。该数据集是通过广义回归神经网络^[24]（GRNNs）方法对AVHRR（Advanced

Very High Resolution Radiometer）地表反射率（LDTR第四版本）反演得到。GLASS VHR LAI空间完整，时间序列连续且平滑，与VALERI（Validation of Land European Remote sensing Instruments）站点衍生的全球高精度LAI参考地图对照，在几种长时间LAI产品（GIMMS3g^[25]、NCEI AVHRR^[26]、GLASS AVHRR和GLOBMAP第二版^[27]）中，GLASS AVHRR LAI与站点观测数据最接近^[28]（均方根误差=0.9014，偏差=-0.1885）。

结合气象数据和LAI数据的时间跨度和时空分辨率，选取1982—2017年为研究时段，用双线性插值法将GLASS LAI的空间分辨率改为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，然后在每个格点上计算各气象要素和LAI的年平均均值。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen估计

Theil-Sen估计^[29,30]，是利用序列中值估计趋势的算法，又称为Sen趋势估计，抗噪性较好，因此可以用于计算气象要素的变化趋势。Sen趋势度计算公式为：

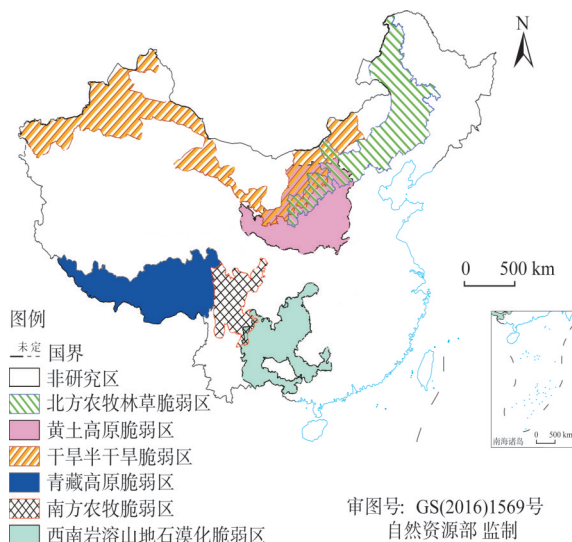
$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), 1 \leq i < j \leq n \quad (2)$$

式中： β 代表趋势度， $\beta > 0$ （或 < 0 ）表示序列呈上升（或下降）趋势；Median代表中位数函数。

1.3.2 主成分分析

通过利用少数几个新变量序列（主成分）反映原多个变量的变化信息，主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）可以降低资料的自由度或维度；同时，计算得到的每一个主成分都对应一个空间模态，空间系数的符号和大小可体现区域差异^[31]。利用



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 中国生态脆弱区分区示意图

Fig. 1 The distribution of ecological fragile zones in China

PCA求出方差贡献率较大的几个LAI主成分,替代原区(多格点)LAI的时间变化;并通过一定的数学变换,将空间系数转换为主成分与LAI的相关系数,相关系数的大小反映了LAI主成分在该区域的代表性。由于同一脆弱区LAI的趋势变化较易具有空间一致性,而年际变化空间差异较大,因此趋势变化的方差贡献往往大于年际变化,据此可间接对LAI的趋势变化和年际变化进行区分。本文着重分析相关系数较大的区域,因为这些区域的LAI变化与主成分比较一致,对各自脆弱区LAI变化的方差贡献大,是LAI变化的敏感区,因此能很好地反映该脆弱区LAI的核心变化特征,有助于进一步探讨影响该区LAI变化的主导气象因子。

进行主成分分析的具体步骤如下:

首先,对年平均LAI数据进行标准化处理;然后,对标准化LAI数据进行主成分分析,得到原主成分 $\alpha_k^0(t)$ 、对应特征值 λ_k (特征值同时也是对应主成分的方差)以及原空间系数 V_k^0 ($1 \leq k \leq m$, m 为设定的主成分个数, $1 \leq t \leq n$, n 为时间长度);最后,利用North检验^[32]方法,对主成分分析的取样误差进行控制。

通过North检验的原主成分 $\alpha_k^0(t)$ 及空间系数 V_k^0 分别除以和乘以 $\sqrt{\lambda_k}$,得到标准化主成分 $\alpha_k(t)$ (即后续提到的主成分PCs)和主成分与LAI的相关系数 V_k 。

$$\alpha_k(t) = \alpha_k^0(t) / \sqrt{\lambda_k}, V_k = V_k^0 \times \sqrt{\lambda_k} \quad (3)$$

1.3.3 相关分析

计算 $\alpha_k(t)$ 与空间各点气象要素的Person相关系数^[33](考虑到原空间系数的符号问题,实际使用 $W_k(t)$ 代替 $\alpha_k(t)$ 计算相关系数),并对相关系数进行 t 检验($P < 0.05$),探讨影响各区LAI变化的主导气象因子。

$$W_k(t) = \alpha_k(t) \times V_k = \alpha_k^0(t) \times V_k^0 \quad (4)$$

对于时间长度为 n 的两个变量 x 和 y , Person相关系数的计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}}, 1 \leq t \leq n \quad (5)$$

2 结果分析

2.1 中国生态脆弱区气象要素变化特征分析

中国生态脆弱区日平均气温全部呈上升趋势(图2a),但不同区域的升温幅度差异明显。其中,升温最大的区域为干旱半干旱脆弱区东北部,其最大升温可达 $6^\circ\text{C}/100\text{ a}$ 以上;干旱半干旱脆弱区东部、黄土高原脆弱区大部 and 青藏高原脆弱区北部气温增幅次之,为 $5^\circ\text{C}/100\text{ a}$ 左右;而升温最小的区域为北方农牧林草脆弱区东南部,其最小升温不足 $0.5^\circ\text{C}/100\text{ a}$ 。对比图2a~图2c可知:中国生态脆弱区日最高和最低气温的趋势空间分布格局与日平均气温大体一致;青藏高原、南方农牧和西南岩溶山地石漠化脆弱区日最高气温的增幅高于日平均和最低气温;而黄土高原脆弱区北部和干旱半干旱脆弱区日最低气温的增幅则明显大于日平均和最高气温。

中国生态脆弱区降水趋势的区域差异显著(图2d),干旱半干旱脆弱区中部和西部、黄土高原脆弱区大部、青藏高原和南方农牧脆弱区北部以及西南岩溶山地石漠化脆

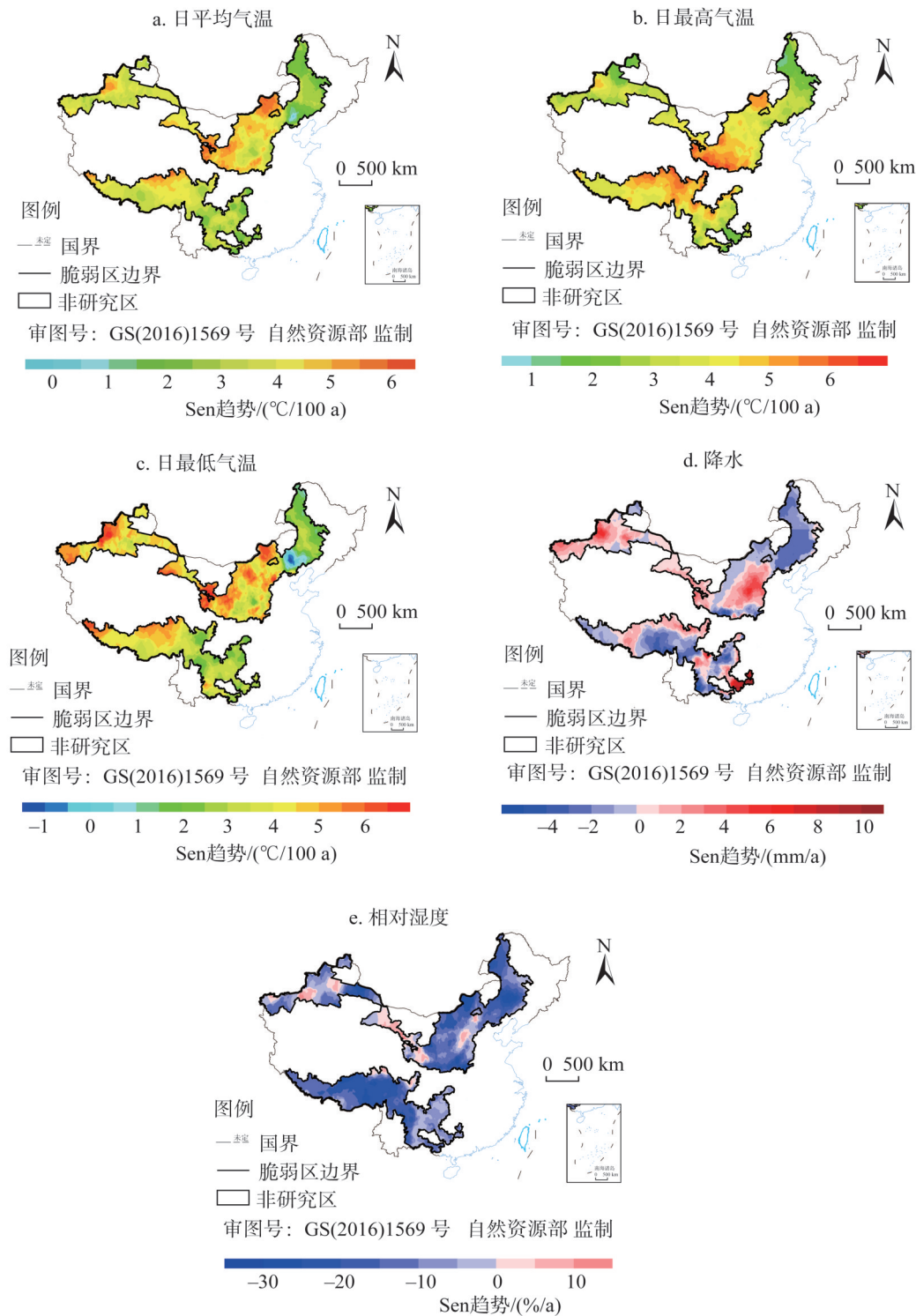


图2 1982—2017年中国生态脆弱区年平均气象要素的Sen趋势

Fig. 2 Sen trend of annual mean climatic factors in ecological fragile zones in China from 1982 to 2017

弱区东部和西部降水呈增长趋势。而干旱半干旱脆弱区东部、黄土高原脆弱区南缘、北方农牧林草脆弱区大部、青藏高原和南方农牧脆弱区大部以及西南岩溶山地石漠化脆弱区东北—西南一带降水呈减少趋势。已有研究表明,中国西北气候呈暖湿变化,这与本文对干旱半干旱脆弱区气温和降水变化趋势的分析一致^[34,35]。

由图2e可知,生态脆弱区相对湿度基本呈下降趋势,这与已有研究结论一致^[11,36]。其中,干旱半干旱脆弱区中西部、黄土高原脆弱区南缘、北方农牧林草脆弱区中北部以及青藏高原脆弱区的部分区域,呈现25%/100 a以上的下降趋势;而干旱半干旱脆弱区中东部及西部的部分区域相对湿度呈增长趋势。

由图3可知,在中国生态脆弱区大部相对湿度与日平均和日最高气温显著负相关,与降水显著正相关,该结果和已有的降水、气温与相对湿度相关性的研究结论一致^[37,38]。相对湿度与日最低气温的相关性较差,除在西南岩溶山地石漠化脆弱区西部有明显负相关外,其他脆弱区普遍没有通过显著性检验。研究表明,相对湿度存在较大日变化^[39,40],而本文所用的资料为日平均相对湿度,这可能是图3c的相关系数大多未通过检验的原因。

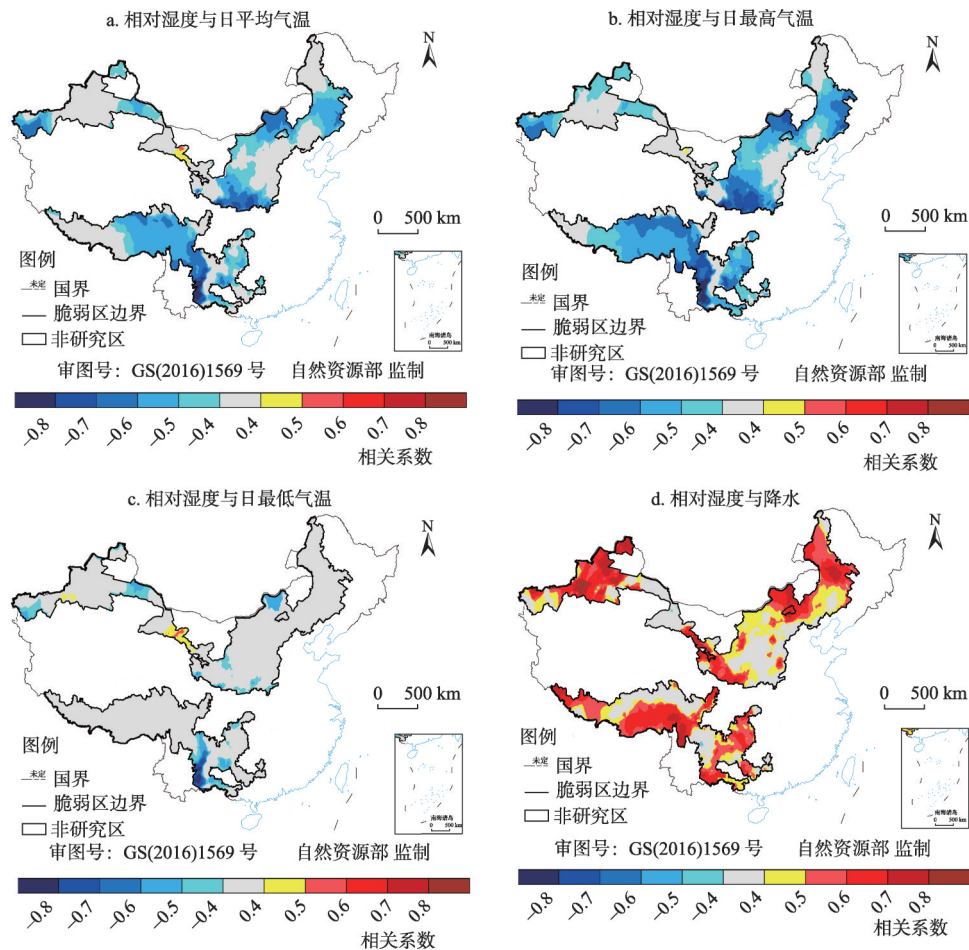


图3 1982—2017年中国生态脆弱区年平均相对湿度与其他气象要素的相关系数
Fig. 3 Correlation coefficients between annual mean relative humidity and other climatic factors
in ecological fragile zones in China from 1982 to 2017

2.2 LAI变化和主导气象因子分析

2.2.1 北方农牧林草脆弱区

通过主成分分析得到北方农牧林草脆弱区LAI前三个主成分(图4)的方差贡献率分别为30.4%、11.7%和5.6%,累计方差贡献率47.7%,且通过了North检验。PC1自1992年开始呈明显上升趋势,东南部和西部LAI与PC1显著正相关,且大部分正相关区域的相关系数在0.8以上。PC2在2001—2011年偏低,基本低于平均值,而在1982—2000年和2012年以后偏高,基本高于多年平均值。PC2与中部LAI显著正相关,相关系数基本在

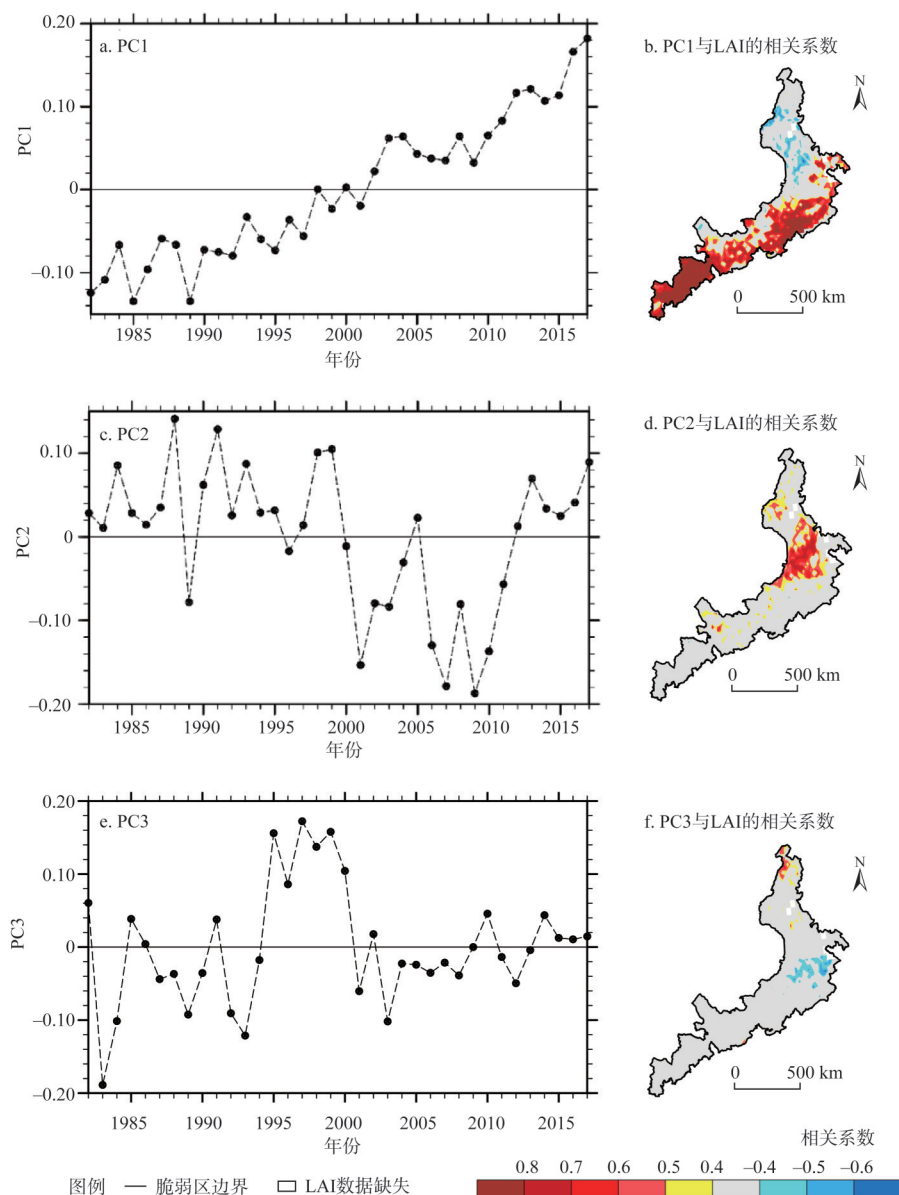


图4 北方农牧林草脆弱区年平均LAI的PC1、PC2和PC3及对应PC与LAI的相关系数(灰色区域相关系数未通过0.05信度检验,下同)

Fig. 4 PC1, PC2, and PC3 of annual mean LAI and correlation coefficients between corresponding PCs and LAI in farming, pasture, forest and grassland ecological fragile zones in Northern China

0.6以上。PC3在1995年之前偏低,1995—2000年偏高,2001年以后又偏低。由于PC3方差贡献较低,只在中东部和东北角的部分区域与LAI相关显著,代表性较差,因此下文只分析PC1和PC2与气象要素的相关性。

由图5a1~图5e1可知,PC1在代表性较好的西部与气温显著正相关,与日平均气温的相关性最好,相关系数多在0.5以上;与降水相关性基本不显著;PC1在东南部与相对湿度显著负相关,负相关系数低于-0.5。

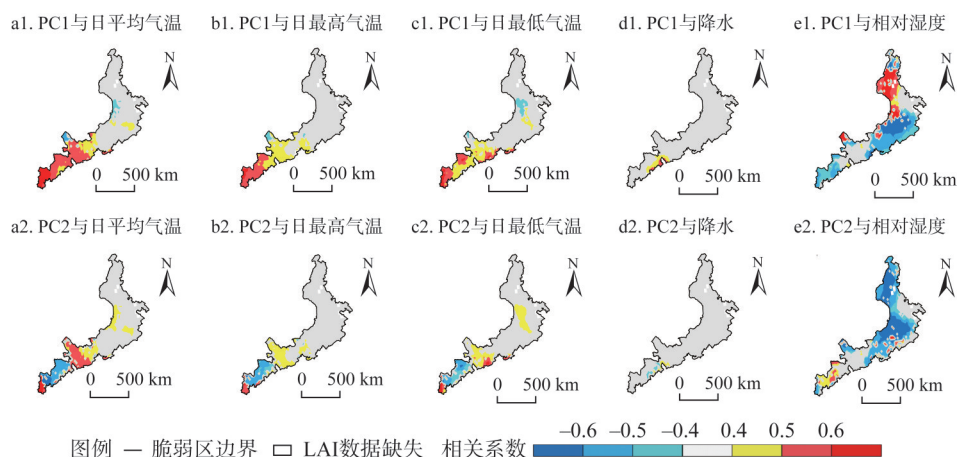


图5 北方农牧林草脆弱区年平均LAI的PC1及PC2与气象因子的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between PC1 and PC2 of annual mean LAI and climatic factors in farming, pasture, forest and grassland ecological fragile zones in Northern China

对气象要素的趋势分析可知,北方农牧林草脆弱区升温普遍,降水北部和东部减少而西部增加,相对湿度普遍下降。结合PC1的增长趋势及其与气象要素的相关系数分布可知,日平均气温是西部LAI增长的主导气象因子;而东南部LAI变化的气象主导因子是相对湿度,其原因尚待进一步研究。

由图5a2~图5e2可知,在代表性较好的中部,PC2与相对湿度的负相关系数位于-0.4~-0.7,负相关显著,同时,PC2在该区域与日平均和日最低气温正相关显著,相关系数为0.4~0.5。从图3a可知,北方农牧林草脆弱区中部相对湿度与日平均气温负相关显著,这很可能是中部LAI与相对湿度负相关显著的原因。因此,中部LAI年际变化的主导气象因子是日平均气温。

综合以上分析可知,北方农牧林草脆弱区LAI的增长趋势由西部和东南部主导,自1992年开始,西部和东南部LAI增长明显,日平均气温是其增长的主导气象因子;北方农牧林草脆弱区LAI年际变化主要由中部主导,日平均气温仍是其主导气象因子。

2.2.2 黄土高原脆弱区

黄土高原脆弱区LAI前两个LAI主成分(图6)的方差贡献率分别为49.2%和6.3%,且通过了North检验。PC1上升趋势明显,且与大部分区域正相关显著,相关系数基本在0.8以上。PC2则主要以十年左右的周期性波动特征为主,然而PC2与LAI的相关性较差,只有极少数区域通过了0.05的信度检验。因此,下面只讨论PC1与气象要素的相关性。

由图7可知,PC1在大部与日平均气温的正相关系数多在0.5以上,最大可达0.8以上,相关性最好;与日最高和最低气温的相关性次之;而在中东部,PC1与降水的相关

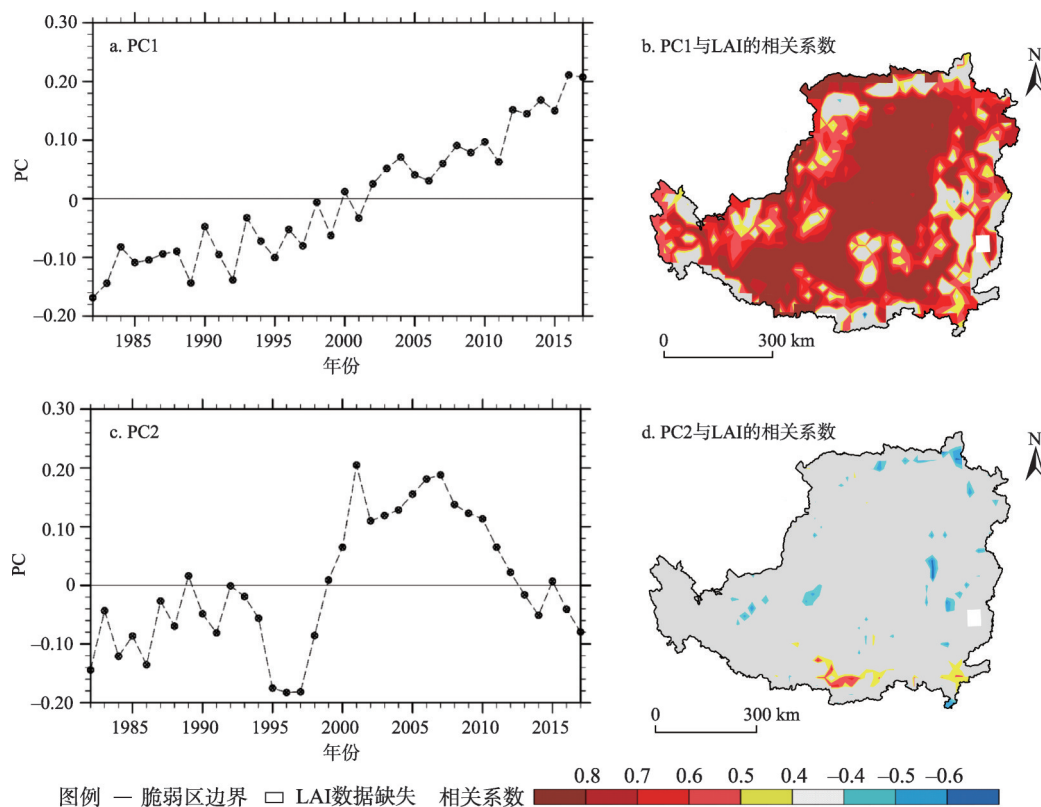


图6 黄土高原脆弱区年平均LAI的PC1和PC2及对应PC与LAI的相关系数

Fig. 6 PC1 and PC2 of annual mean LAI and correlation coefficients between corresponding PCs and LAI in ecological fragile zones of Loess Plateau

系数可达0.6甚至0.7以上，相关性最好。而在西北部 and 南部部分区域，PC1与相对湿度负相关显著。

黄土高原脆弱区升温普遍，中东部升温较弱但降水和相对湿度增加明显。结合PC1的显著增长趋势及其与气象要素的相关系数可知，大部LAI增长的主导气象因子是日平均气温，而降水是中东部LAI增加的主导气象因子。从图3a、图3b可知，黄土高原脆弱区西北部 and 南部部分区域相对湿度与日平均和日最高气温负相关显著，这可能是PC1在该区域与相对湿度负相关显著的原因。

综合以上分析可知，黄土高原脆弱区LAI全区一致呈增长趋势，大部LAI增长的主导气象因子是日平均气温，而中东部LAI增长的主导气象因子是降水。中东部LAI变化的主导气象因子与其他区域不同，可能是因为该区升温较弱而降水增加明显，反映出降水对气温影响的调制作用。

2.2.3 干旱半干旱脆弱区

干旱半干旱脆弱区LAI前两个主成分（图8）的方差贡献率分别为28%和7.2%，通过了North检验。PC1增长明显，且1997年之后的增长速度较之前明显提升。PC1与大部LAI的相关性都很好，相关系数多在0.7甚至0.8以上。PC2则主要体现了东北部LAI的年际振荡，且2005年以后偏低，之前偏高。

由图9a1~图9e1可知，PC1在大部与日平均和日最低气温的相关性最好。PC1与日最

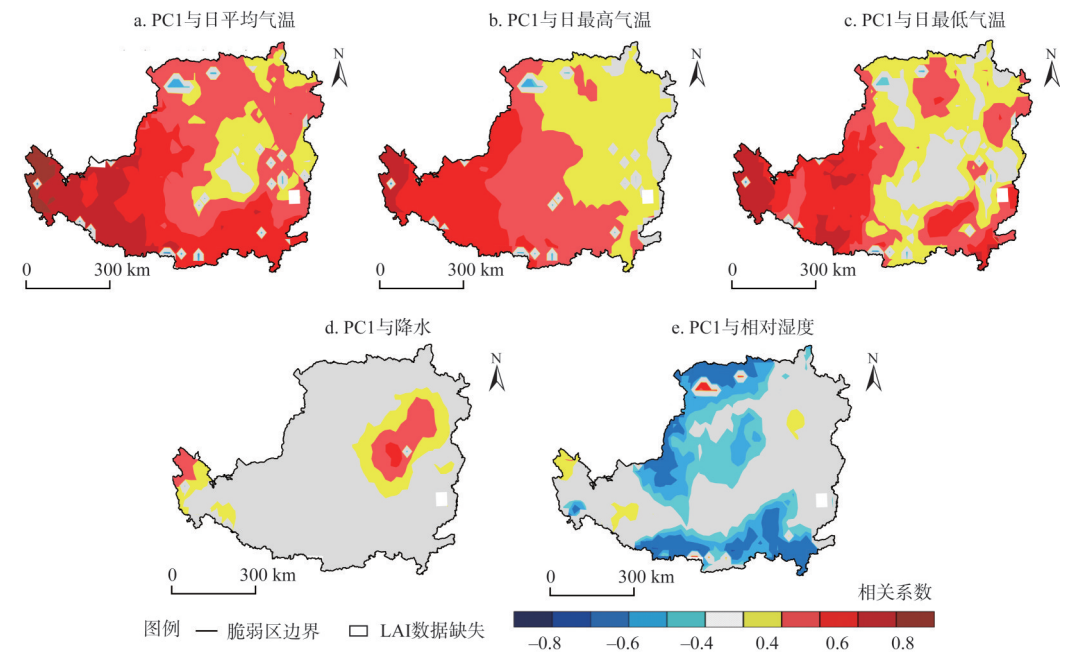


图7 黄土高原脆弱区年平均LAI的PC1与气象因子的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients between PC1 of annual mean LAI and climatic factors in ecological fragile zones of Loess Plateau

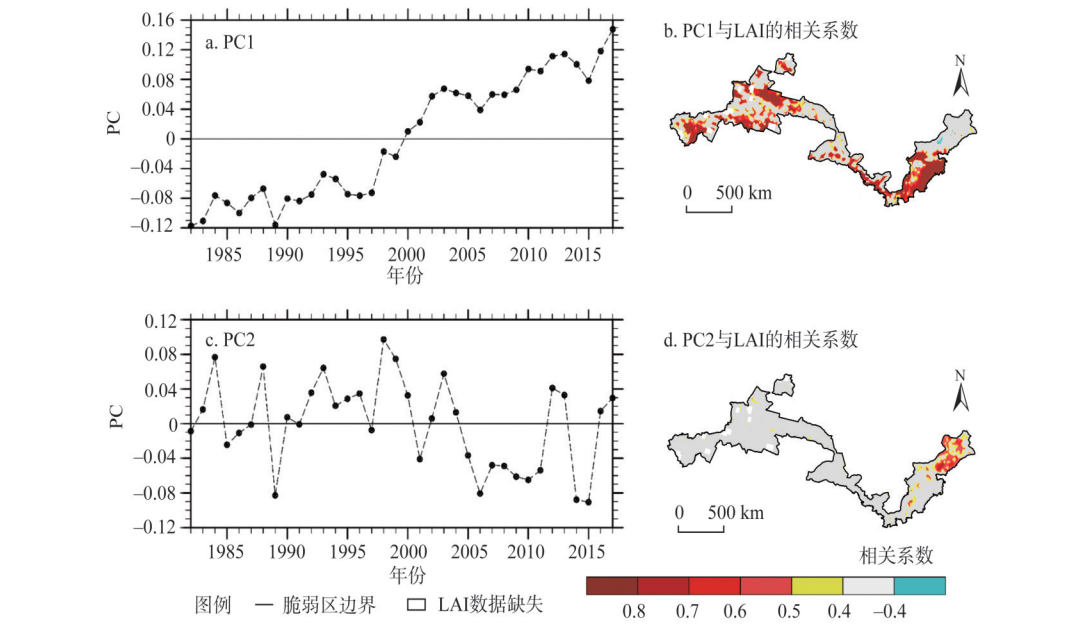


图8 干旱半干旱脆弱区年平均LAI的PC1和PC2及对应PC与LAI的相关系数

Fig. 8 PC1 and PC2 of annual mean LAI and correlation coefficients between corresponding PCs and LAI in ecological fragile zones of arid and semi-arid areas

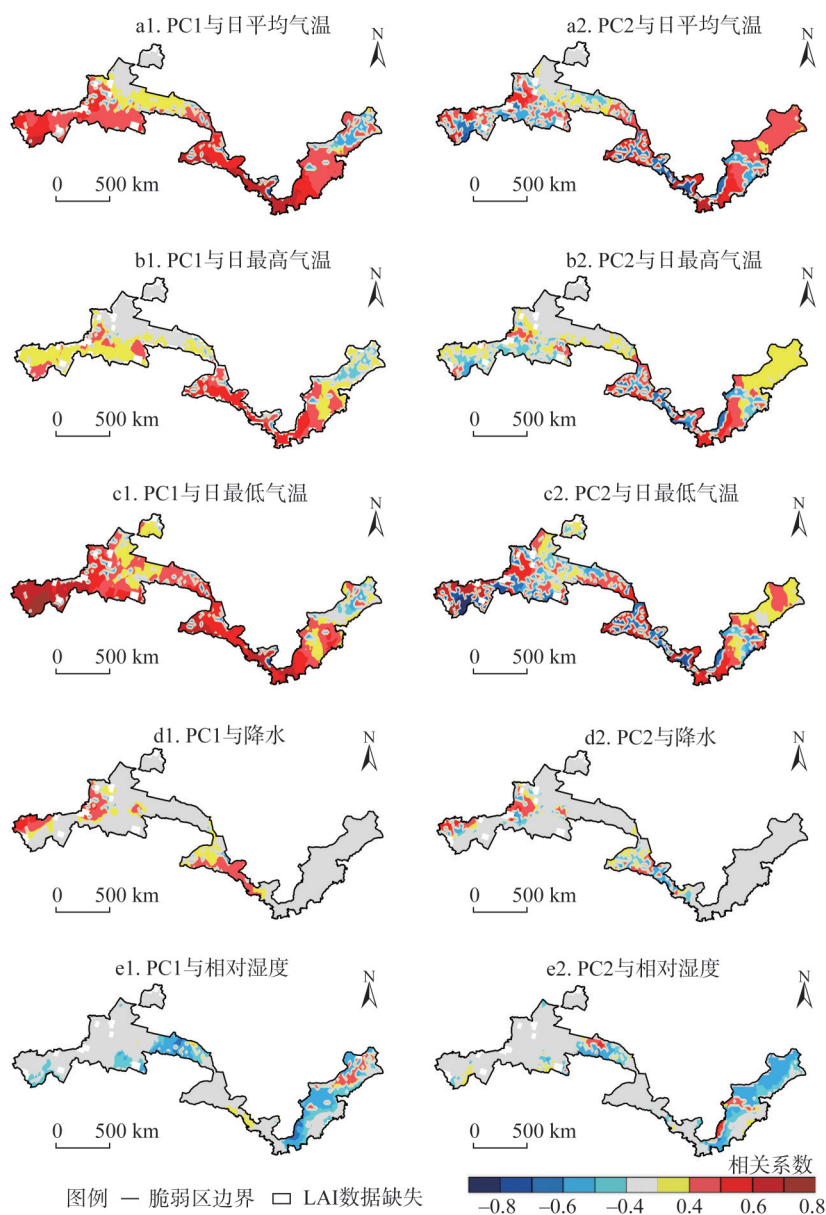


图9 干旱半干旱脆弱区年平均LAI的PC1及PC2与气象因子的相关系数

Fig. 9 Correlation coefficients between PC1 and PC2 of annual mean LAI and climatic factors in ecological fragile zones of arid and semi-arid areas in Northern China

低气温的相关系数在西部最高，最高可达0.8以上，而PC1与日平均气温的相关性在东南部表现更好。另外，在中部和西南部，PC1与降水也呈显著正相关，但相关系数小于气温。而PC1与相对湿度在东部和中西部的显著负相关，主要来源于该区相对湿度与气温的显著负相关关系（图3a、图3b、图3c）。

由2.1可知，干旱半干旱脆弱区气温显著上升，尤其是日最低气温，降水除东段外基本增加，相对湿度普遍下降。结合PC1的显著增长趋势及其与气象要素的相关系数可知，干旱半干旱脆弱区大部LAI增加的主导气象因子是气温。

由图 9a2~图 9e2 可知, PC2 在显著相关的东北部与日平均气温的正相关系数最高, 在 0.5~0.6 之间, 与相对湿度的负相关性最好, 负相关系数在 -0.4~-0.6 之间。东北部升温十分剧烈, 最大升温幅度可达 6 °C/100 a 以上, 而该区降水和相对湿度减少明显。从图 3a 可知, 干旱半干旱脆弱区东北部相对湿度与日平均气温负相关显著, 因此 PC2 在东北部与相对湿度的负相关系数主要来源于相对湿度与日平均气温的负相关关系, 干旱半干旱脆弱区东北部 LAI 的年际振荡仍由日平均气温主导。虽然 PC2 在东北部与降水或相对湿度的正相关关系并不显著, 但该区域剧烈升温, 引起湿度下降, 可能导致了该区域 LAI 在 21 世纪的下降趋势。

因此, 干旱半干旱脆弱区大部 LAI 增长显著, LAI 增长的主导气象因子是日平均/最低气温, 日平均气温同时也是主导东北部 LAI 年际变化的气象因子, 另外, 该区 LAI 变化受湿度状况调制。

2.2.4 青藏高原脆弱区

青藏高原脆弱区 LAI 前两个主成分 (图 10) 的方差贡献率分别是 26% 和 6.6%, 通过了 North 检验。PC1 在 1998 年前后发生明显改变, 1998 年之后基本高于平均值, 而之前基本低于平均值。PC1 与大部 LAI 显著相关, 相关系数多在 0.7 以上。PC2 在 2013 年以后和 1999 年之前呈显著下降趋势, 在 1999—2013 年之间呈增长趋势, 其年际振荡较 PC1 明显。PC2 与 LAI 的相关系数多在 -0.5 以下, 只在中南部部分区域与 LAI 相关显著, 方差贡献低, 代表性较差。故下文对 PC2 与气象要素的相关性不做分析。

由图 11 可知, 在青藏高原脆弱区大部, PC1 与日平均气温的相关系数多在 0.7 甚至

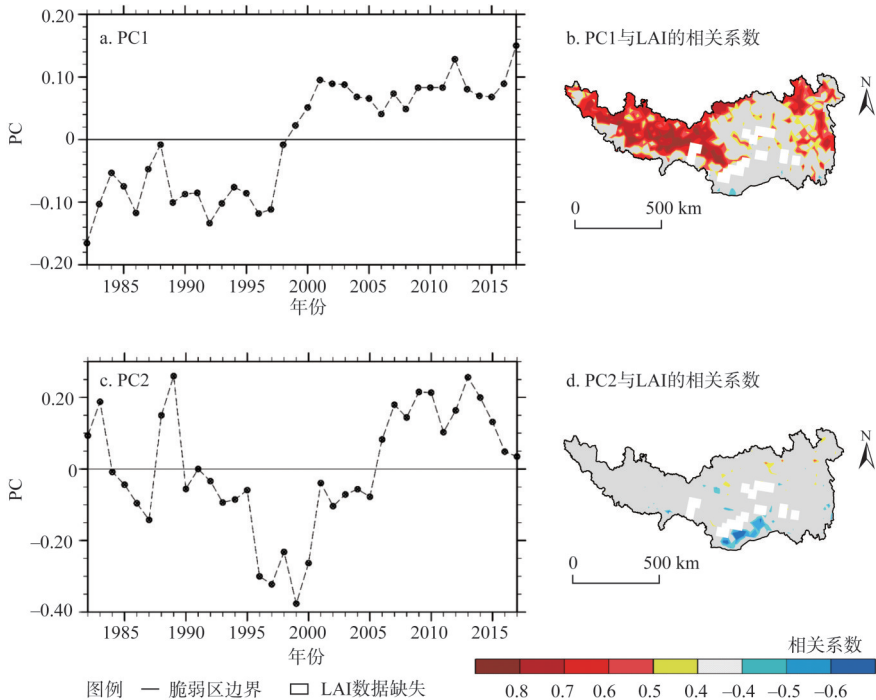


图 10 青藏高原脆弱区年平均 LAI 的 PC1 和 PC2 及对应 PC 与 LAI 的相关系数
Fig. 10 PC1 and PC2 of annual mean LAI and correlation coefficients between corresponding PCs and LAI in ecological fragile zones of Tibetan plateau

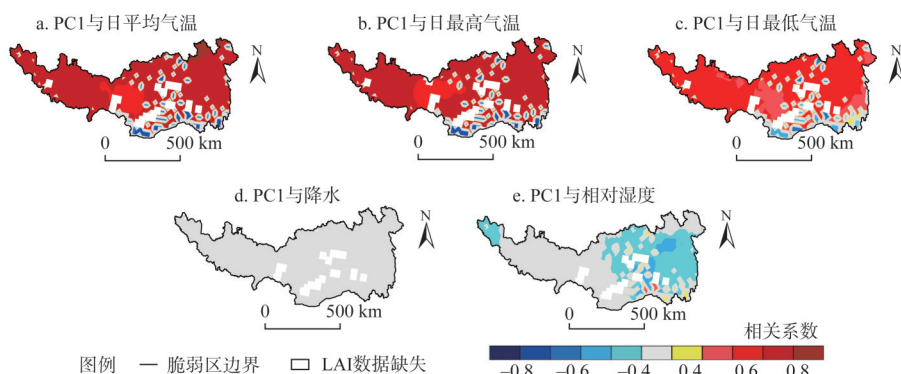


图 11 青藏高原脆弱区年平均 LAI 的 PC1 与气象因子的相关系数

Fig. 11 Correlation coefficients between PC1 of annual mean LAI and climatic factors in ecological fragile zones of Tibetan Plateau

0.8 以上，相关程度最高，其次是日最高和日最低气温；PC1 与降水相关不显著；而在东部和西北角与相对湿度显著负相关，相关系数多在 -0.4 以下。PC1 与相对湿度的显著负相关主要来源于该区相对湿度与气温的显著负相关（图 3a 和图 3b）。

1982—2017 年，青藏高原脆弱区日平均气温上升明显；区域平均气温 1998 年以后偏高^[41]，以前偏低；降水中西部和东北部增长；相对湿度普遍下降。结合 PC1 及其与气象要素的相关系数可知，大部 LAI 在 1998 年前后突变式增长的主导气象因子是日平均气温，而降水增长对其没有显著贡献。

2.2.5 南方农牧脆弱区

南方农牧脆弱区 LAI 前两个主成分（图 12）的方差贡献率分别为 23.9% 和 9.4%，通过了 North 检验。PC1 基本呈增长趋势，其在南部偏西地区与 LAI 的相关系数和北部及东南部相反，南部偏西地区的负相关系数多在 -0.5 以下，而北部和东南部的正相关系数多在 0.6 以上。PC2 则以年际波动为主。PC2 只有零星区域刚刚通过显著性检验，代表性较差，因此下文只讨论 PC1 与气象要素的关系。

由图 13 可知，PC1 在北部和东南部与日最高气温的相关系数多在 0.7 以上，相关性最好，其次是日平均气温；而在南部偏西地区与气温显著负相关，与相对湿度显著正相关；PC1 与降水无显著相关关系。由前文分析可知，南方农牧脆弱区日最高气温增长显著，而在南部偏西地区升温相对较弱；降水北部和东南部增加，其他区域减少；相对湿度下降明显，尤其是西北和东南部。综合以上信息，我们可以推断：近几十年来，日最高气温是北部和东南部 LAI 增加的主导气象因子；而相对湿度是南部偏西地区 LAI 减少的主导气象因子，升温有可能加剧该区的干旱状况，从而不利于 LAI 增长。

因此，南方农牧脆弱区 LAI 的增长趋势由其北部和东南部主导，日最高气温是 LAI 增长的主导气象因子，而南部偏西地区 LAI 的减少趋势则主要与相对湿度减少有关。

2.2.6 西南岩溶山地石漠化脆弱区

西南岩溶山地石漠化脆弱区 LAI 的前三个主成分（图 14）的方差贡献率分别为 39.9%、7.7% 和 5.0%，且均通过了 North 检验。PC1 在 1992 年之后呈增长趋势，之前呈下降趋势。PC1 与大部 LAI 显著相关，相关系数多在 0.8 以上。PC2 主要呈周期性波动特

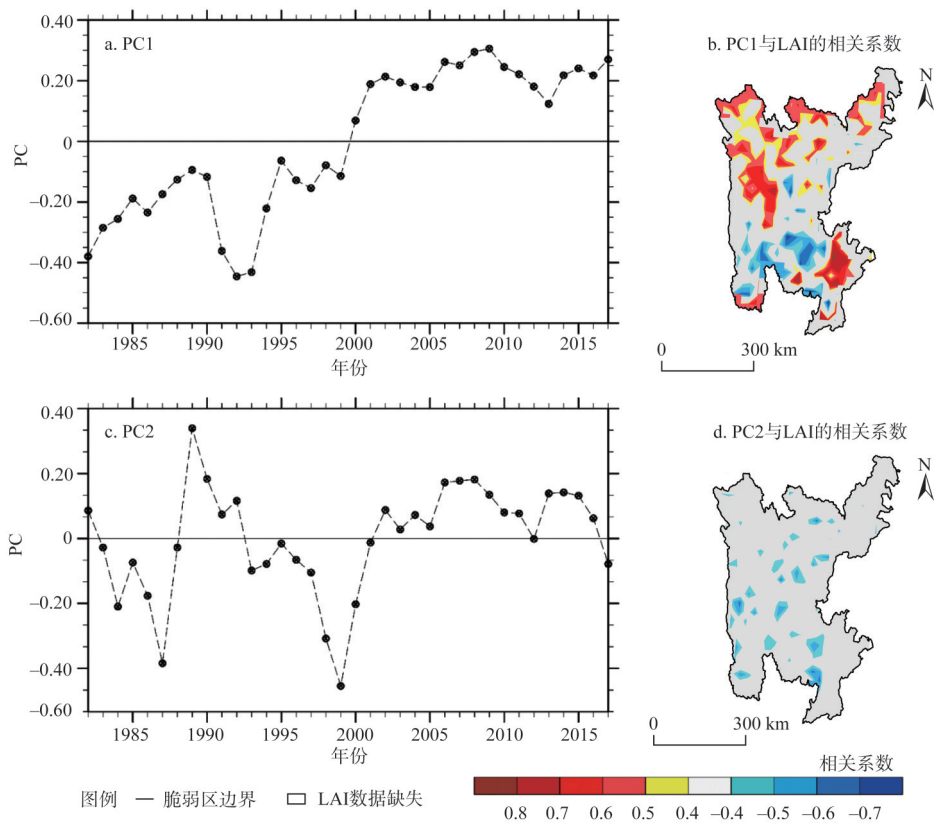


图 12 南方农牧脆弱区年平均 LAI 的 PC1 和 PC2 及对应 PC 与 LAI 的相关系数

Fig. 12 PC1 and PC2 of annual mean LAI and correction coefficients between corresponding PCs and LAI in farming and pasture ecological fragile zone of Southern China

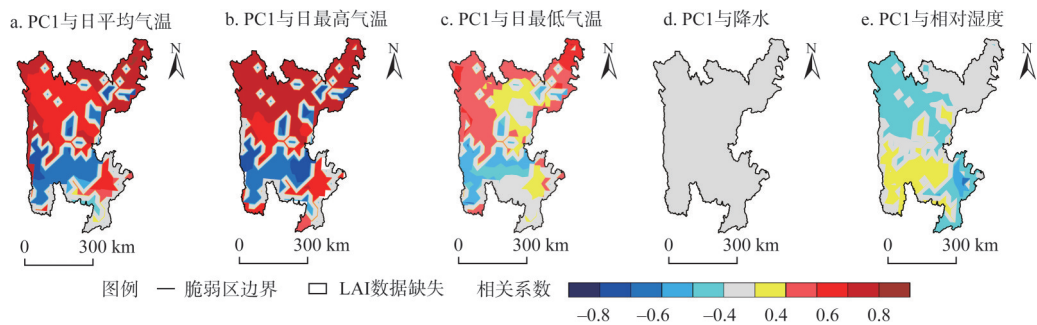


图 13 南方农牧脆弱区年平均 LAI 的 PC1 与气象因子的相关系数

Fig. 13 Correlation coefficients between PC1 of annual mean LAI and climatic factors in farming and pasture ecological fragile zones of Southern China

征。PC3 在 2000 年之后变化趋势不明显，而之前基本呈增长趋势。PC2 和 PC3 都伴随着剧烈的年际振荡。由于 PC2 和 PC3 的方差贡献率较低，与 LAI 的相关系数大部分都没有通过显著性检验，代表性较差。因此下文只讨论 PC1 与气象要素的相关性。

由图 15 可知，PC1 与日平均气温的相关系数多在 0.6 以上，相关性最好，其次是日最高和最低气温。PC1 与相对湿度的显著负相关集中于西部，负相关主要来源于相对湿度

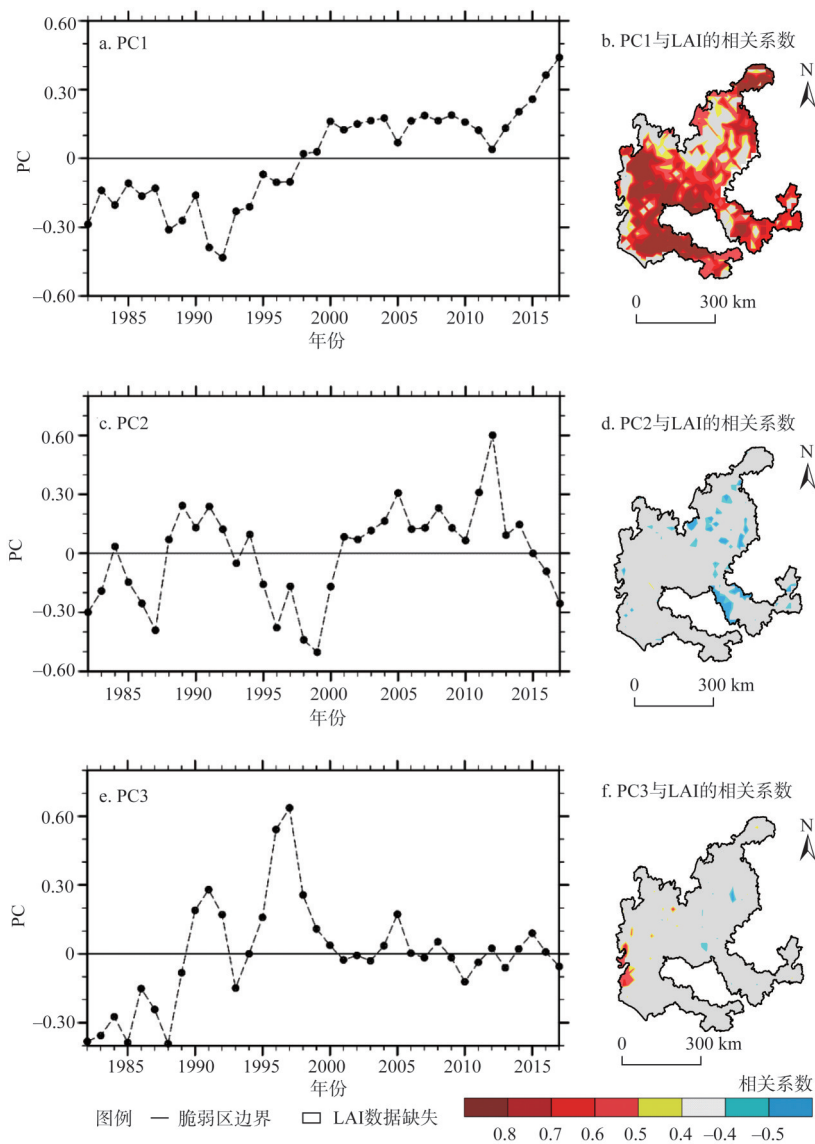


图 14 西南岩溶山地石漠化脆弱区年平均LAI的PC1、PC2和PC3及对应PC与LAI的相关系数

Fig. 14 PC1, PC2 and PC3 of annual mean LAI and correlation coefficients between corresponding PCs and LAI in ecological fragile zones of karst areas in Southwestern China

与气温的显著负相关关系（图 3a、图 3b、图 3c）。PC1 与降水的相关性不显著。

综合以上分析可知，西南岩溶山地石漠化脆弱区在 1992 年以后转为明显增长趋势，日平均气温是该区 LAI 增长的气象主导因子。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文分析了中国生态脆弱区 LAI 的变化特征及其主导气象因子，主要结论如下：

（1）1982—2017 年，中国生态脆弱区年平均气温基本呈上升趋势，年降水趋势区域

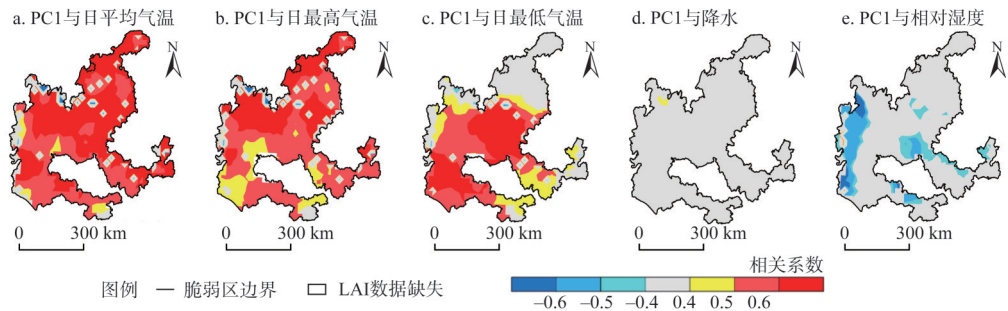


图 15 西南岩溶山地石漠化脆弱区年平均 LAI 的 PC1 与气象因子的相关系数
Fig. 15 Correlation coefficients between PC1 of annual mean LAI and climatic factors
in ecological fragile zones of karst in Southwestern China

差异较大，年均相对湿度普遍呈下降趋势。

(2) 中国各生态脆弱区 LAI 的 PC1 基本呈增长趋势，表明增长是近几十年中国生态脆弱区 LAI 变化的核心特征。

(3) 干旱半干旱、黄土高原、青藏高原和西南岩溶山地石漠化脆弱区 LAI 变化的时空一致性较好，PC1 与 LAI 相关系数的符号在每个区分别保持一致。与之相比，北方农牧林草脆弱区和南方农牧脆弱区 LAI 变化的时空一致性较差，其 PC1 主要反映了 LAI 变化敏感区的特征。北方农牧林草脆弱区 LAI 的增长趋势主要由其西部和东南部主导，南方农牧脆弱区 LAI 的增长趋势由其北部和东南部主导。

(4) 气温是中国生态脆弱区 LAI 增长的主导气象因子。生态脆弱区大部 LAI 增长的主导气象因子是日平均气温，而干旱半干旱脆弱区西部和南方农牧脆弱区 LAI 增长的主导气象因子分别是日最低气温和最高气温。除干旱半干旱脆弱区外，中国生态脆弱区 LAI 变化受日最高气温的影响比日最低气温更大。

3.2 讨论

本文利用 PCA 方法统一分解和提取了中国 6 个典型生态脆弱区 LAI 变化的核心特征，在此基础上进行相关分析，从而得出近几十年来中国生态脆弱区 LAI 增长的主导气象因子是气温的结论。该结论与最近的一些研究结论一致^[42,43]。已有研究表明，升温有助于打破低温限制，促进植物光合作用，延长生长季，从而有助于促进植物生长，提高生态系统生产力^[44,45]；但升温也可能导致展叶所需的低温累积减少，不利于打破叶片休眠^[45]，而过度升温可能引起干旱，对植物产生严重危害^[46,47]。近几十年来，升温有助于中国生态脆弱区大部 LAI 的增长，从而有助于生态恢复；但在北方农牧林草脆弱区北部和南方农牧脆弱区西南，植被生长主要受湿度限制，持续升温可能会加剧干旱，使得植被进一步退化。全球变暖不断加剧，生态脆弱区作为气候变化敏感地带，其对生态系统的影响需要引起持续关注。

一般认为，干旱半干旱脆弱区植被生长主要受水分限制^[48]，而本文表明该区 LAI 增长趋势的主导气象因子是气温，二者其实并不矛盾。近几十年来，干旱半干旱脆弱区整体升温^[41]，有利于植物生长季延长，提高光合效率，但该区域降水的增长趋势不显著^[41]且缺乏一致性。这很可能是 PCA 方法得出该区 LAI 的趋势变化由气温主导而未体现降水影响的重要原因。另外，伴随气温升高，西北干旱区冰雪融水增加，土壤湿度增加^[49,50]，

植被生长受水分胁迫减少,很可能导致该区 LAI 变化对降水的敏感性降低,使得 LAI 的 PC2 与降水的相关系数也不显著。

相对于降水,北方农牧林草和南方农牧脆弱区 LAI 变化与相对湿度相关关系更好,可能因为它能更好地反映一些区域真实的干湿状况。相对湿度反映了一定温度条件下空气中水汽的饱和程度。在水汽条件不变的情况下,升温可以增加饱和水汽压从而使相对湿度减少;在温度不变的情况下,降水则可通过增加空气中水汽含量使相对湿度增加。在下一步工作中,将结合 CN0 5.1 数据及其他气象与生态观测数据,进一步深入研究日较差、ET、干燥度等综合指数与 LAI 变化的关系。

与以往研究^[14-17]中生态脆弱区植被变化的主导气象因子随研究区域显著变化不同,本文对 6 个典型生态脆弱区的研究结果具有较高的一致性。其原因除了较长的研究时段,还有研究所用的 PCA 方法。PCA 不仅可以有效提取区域核心变化特征,还在一定程度上对趋势和年际变化进行了区分,避免了直接进行相关统计时次要信号对相关统计结果的影响,使得结果更加可靠。PCA 方法在气象上应用较广,而在生态学研究领域,直接将该方法应用于数据分析的研究还相对较少。但 PCA 的结果对研究区域及时段存在一定的依赖。区域划分不同,区域的共性特征相应有所不同。增加时间长度或选取不同时段(特别是研究时段气候—生态系统存在转折突变时),研究结论也有可能产生差异。

本文只对中国生态脆弱区年均 LAI 进行了分析,没有区分植被类型。但植被生长不同阶段 LAI 变化与气象要素的关系可能不同,不同类型生态系统 LAI 变化对气候变化的响应也可能存在差异^[48]。另外,近几十年来人类活动加剧,包括农作物播种面积和耕作方式变化以及退耕还林、退牧还草等生态保护与修复工程,这些必然会对生态系统产生重要影响。例如,黄土高原生态脆弱区 LAI 增加,与植树造林等大规模植被恢复措施有很大关系。因此需要进一步探讨生态脆弱区不同生态系统和植物生长不同阶段 LAI 的变化及其主导气象因子以及人类活动影响,深入理解植被对气候变化响应的物理机制。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 全国生态脆弱区保护规划纲要. http://www.gov.cn/gzdt/2008-10/09/content_1116193.htm, 2008-09-27. [Environmental Protection Department of the People's Republic of China. Outline of the national ecological vulnerability protection program. http://www.gov.cn/gzdt/2008-10/09/content_1116193.htm. 2008-09-27.]
- [2] XIAO Z Q, LIANG S L, WANG J D, et al. Long time-series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 1-18.
- [3] FANG H L, BARET F, PLUMMER S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 739-799.
- [4] Global Climate Observing System (GCOS). Systematic observation requirements for satellite-based products for climate, 2011 update, supplemental details to the satellite-based component of the implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 Update). Geneva, Switzerland: WMO, 2011: 1-127.
- [5] 于贵瑞, 徐兴良, 王秋凤, 等. 全球变化对生态脆弱区资源环境承载力的影响研究. *中国基础科学*, 2017, 19(6): 19-23, 35. [YU G R, XU X L, WANG Q F, et al. Study on the effects of global change on resources and environment carrying capacity in ecological fragile zones in China. *China Basic Science*, 2017, 19(6): 19-23, 35.]
- [6] MENZEL A, SPARKS T H, ESTRELLA N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1969-1976.
- [7] MYOUNG B, NIELSEN-GAMMON J W. The convective instability pathway to warm season drought in Texas. Part I: The role of convective inhibition and its modulation by soil moisture. *Journal of Climate*, 2010, 23(17): 4461-4473.
- [8] GRANTZ D A. Plant response to atmospheric humidity. *Plant Cell & Environment*, 1990, 13(7): 667-679.

- [9] MU Q Z, ZHAO M S, HEINSCH F A, et al. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, G1(112): G01012, Doi:10.1029/2006JG000179.
- [10] 赵威, 韦志刚, 郑志远, 等. 1964—2013年中国北方农牧交错带温度和降水时空演变特征. *高原气象*, 2016, 35(4): 979-988. [ZHAO W, WEI Z G, ZHENG Z Y, et al. Surface temperature and precipitation variation of pastoral transitional zone in Northern China during 1964-2013. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(4): 979-988.]
- [11] 李志, 赵西宁. 1961—2009年黄土高原气象要素的时空变化分析. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 287-299. [LI Z, ZHAO X N. Spatiotemporal analysis of meteorological elements on the Loess Plateau during 1961-2009. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 287-299.]
- [12] 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区降水时空分布特征. *生态学报*, 2015, 35(17): 5846-5855. [YAO J Q, YANG Q, LIU Z H, et al. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5846-5855.]
- [13] 焦洋, 游庆龙, 林厚博, 等. 1979—2012年青藏高原地区地面气温时空分布特征. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 283-291. [JIAO Y, YOU Q L, LIN H B, et al. Spatiotemporal distribution of surface temperature over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2012. *Arid Zone Research*, 2016, 33(2): 283-291.]
- [14] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268. [MU S J, LI J L, CHEN Y Z, et al. Temporal and spatial characteristics of vegetation coverage in Inner Mongolia from 2001 to 2010. *Journal of Geography*, 2012, 67(9): 1255-1268.]
- [15] 史娜娜, 全占军, 韩煜, 等. 东北林草交错区植被NDVI时空特征及其与气候因子关系分析. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 175-182. [SHI N N, QUAN Z J, HAN Y, et al. Spatial and temporal characteristics of NDVI and its relationship with climate factors in the northeast forest grass ecotone. *Soil and Water Conservation Research*, 2016, 23(5): 175-182.]
- [16] 罗玲, 王宗明, 宋开山, 等. 1982—2003年中国东北地区不同类型植被NDVI与气候因子的关系研究. *西北植物学报*, 2009, 29(4): 800-808. [LUO L, WANG Z M, SONG K S, et al. Study on the relationship between NDVI and climatic factors of different vegetation types in Northeast China from 1982 to 2003. *Journal of Northwest Flora*, 2009, 29(4): 800-808.]
- [17] XU X K, CHEN H, LEVY J K. Spatiotemporal vegetation cover variations in the Qinghai-Tibet Plateau under global climate change. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 915-922.
- [18] LIU M Z, WANG Z W, LI S S, et al. Changes in specific leaf area of dominant plants in temperate grasslands along a 2500 km transect in Northern China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10780, Doi:10.1038/s41598-017-11133-z.
- [19] PIAO S L, YIN G D, TAN J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [20] ZHOU W, GANG C C, ZHOU L, et al. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the Northwest China. *Acta Oecologica*, 2014, 55: 86-96.
- [21] WU J S, FENG Y F, ZHANG X Z, et al. Grazing exclusion by fencing non-linearly restored the degraded alpine grasslands on the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2017, 7: 15202, Doi: 10.1038/s41598-017-15530-2.
- [22] LORENZ E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. *Scientific Report*, 1956, 1: 49.
- [23] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102-1111. [WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1102-1111.]
- [24] SPECHT D F. A general regression neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1991, 2(6): 568-576.
- [25] ZHU Z C, BI J, PAN Y Z. Global data sets of vegetation Leaf Area Index (LAI) 3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) 3g derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981-2011. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 927-948.
- [26] CLAVERIE M, MATTHEWS J L, VERMOTE E F. A 30+ year AVHRR LAI and FAPAR climate data record: Algorithm description and validation. *Remote Sensing*, 2016, 3(8): 263-275.
- [27] LIANG S L, ZHAO X, LIU S H, et al. A long-term Global L and Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies. *International Journal of Digital Earth*, 2013, s6: 5-33.
- [28] XIAO Z Q, LIANG S L, JIANG B. Evaluation of four long time-series global leaf area index products. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 218-230.

- [29] THEIL H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I, II, III. *PNAS*, 1950, 53: 386-392, 521-525; 1397-1412.
- [30] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [31] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法. 北京: 气象出版社, 2005. [WU H B, WU L. *Methods of Climate Variability Diagnosis and Prediction*. Beijing: China Meteorological Press, 2005.]
- [32] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [33] PEARSON K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1895, 58: 240-242.
- [34] SHI Y F, SHEN Y P, LI D L, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164.
- [35] 张扬, 李宝富, 陈亚宁. 1970—2013年西北干旱区空中水汽含量时空变化与降水量的关系. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 1043-1055. [ZHANG Y, LI B F, CHEN Y N. The temporal and spatial variation of water vapor content and its relationship with precipitation in the arid region of Northwest China from 1970 to 2013. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 1043-1055.]
- [36] 李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析. *高原山地气象研究*, 2016, 36(4): 42-47. [LI H, HAN L, JIA Z J, et al. The changes of the average relative humidity in Southwest China. *Plateau & Mountain Meteorology Research*, 2016, 36(4): 42-47.]
- [37] LU E, TAKLE E S. Spatial variabilities and their relationships of the trends of temperature, water vapor, and precipitation in the North American Regional Reanalysis. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D06110), Doi: 10.1029/2009JD013192.
- [38] 马悦, 周顺武, 丁锋, 等. 中国东部地区冬夏季相对湿度变化特征. *气象与环境科学*, 2014, 37(4): 1-7. [MA Y, ZHOU S W, DING F, et al. Characteristics of relative humidity in winter and summer in Eastern China. *Meteorology and Environmental Science*, 2014, 37(4): 1-7.]
- [39] GAFFEN D J, ROSS R J. Climatology and trends of U.S. surface humidity and temperature. *Journal of Climate*, 1999, 12(3): 811-828.
- [40] 刘明春, 杨晓玲, 殷玉春, 等. 武威市相对湿度气候特征及预报. *干旱区研究*, 2012, 29(4). [LIU M C, YANG X L, YIN Y C, et al. Climate characteristics and prediction of relative humidity in Wuwei city. *Arid Area Research*, 2012, 29(4): 654-659.]
- [41] 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 1980—2014年中国生态脆弱区气候变化特征分析. *气候与环境研究*, 2019, 24(4): 455-468. [SUN K H, ZENG X D, LI F. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980-2014. *Climatic and Environmental Research*, 2019, 24(4): 455-468.]
- [42] YAO Y, WANG X, LI Y, et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 184-196.
- [43] QI Z H, LIU H Y, WU X C, et al. Climate-driven speedup of alpine treeline forest growth in the Tianshan Mountains, Northwestern China. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 816-826.
- [44] WU Z T, DIJKSTRA P, KOCH G W, et al. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 927-942.
- [45] CHEN L, HUANG J G, MA Q Q, et al. Long-term changes in the impacts of global warming on leaf phenology of four temperate tree species. *Global Change Biology*, 2019, 25(3): 997-1004.
- [46] 柳媛普, 王素萍, 王劲松, 等. 气候变暖背景下西南地区干旱灾害风险评估. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 325-336. [LIU Y P, WANG S P, WANG J S, et al. Risk assessment of drought disaster in Southwest China under the background of climate warming. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 325-336.]
- [47] RYAN E M, OGLE K, PELTIER D, et al. Gross primary production responses to warming, elevated CO₂, and irrigation: Quantifying the drivers of ecosystem physiology in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, 2017, 8(23): 3092-3106.
- [48] HUANG L, HE B, CHEN A F, et al. Drought dominates the interannual variability in global terrestrial net primary production by controlling semi-arid ecosystems. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24639, Doi: 10.1038/srep24639.
- [49] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1283-1291. [YAO J

Q, YANG Q, CHEN Y N, et al. Climate change in arid areas of Northwest China in past 50 years and its effects on the local ecological environment. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5): 1283-1291.]

- [50] 刘丽伟, 魏栋, 王小巍, 等. 多种土壤湿度资料在中国地区的对比分析 干旱气象, 2019, 37(1): 40-47. [LIU L W, WEI D, WANG X W, et al. Multi- data intercomparison of soil moisture over China. *Journal of Arid Meteorology*, 2019, 37(1): 40-47.]

Study on the dominant climatic driver affecting the changes of LAI of ecological fragile zones in China

SUN Kang-hui^{1,2,3}, ZENG Xiao-dong^{1,4,5}, LI Fang¹

(1. International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China; 2. Jiangxi Provincial Meteorological Observatory, Nanchang 330096, China;

3. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Studying the dominant climatic driver affecting the changes of leaf area index (LAI) in China's ecological fragile zones under the background of climate change is of great significance in revealing the changes of land ecosystem and its dynamic response to climate change, as well as ecological restoration. Based on CN0 5.1 climatic data and Global Land Surface Satellite (GLASS) product of LAI, we study the changes of LAI and its dominant climatic driver in China's ecological fragile zones from 1982 to 2017, using Principal Component Analysis. Results show that temperature is on the rise in ecological fragile zones, while the regional difference of precipitation changes is significant. LAI showed an increasing trend from 1982 to 2017 in most of the ecological fragile zones, including arid and semi-arid region, Loess Plateau, Tibetan Plateau, and karst areas in Southwestern China, as well as the west and southeast of the farming, pasture, forest and grassland ecological fragile zone of Northern China and the north and southeast of the farming and pasture ecological fragile zone of Southern China. Temperature, especially daily average temperature, is the dominant climatic driver for LAI growth in most of the ecological fragile zones in China, while daily minimum and maximum temperature dominate the west of arid and semi-arid region and the south agriculture and pasture ecological fragile zone, respectively. This study emphasizes the positive impact of warming on vegetation growth in the present, however, it also depends on humidity condition.

Keywords: leaf area index; climatic driver; climate change; ecological fragile zone; China