

丹利, 谢明. 2009. 基于 MODIS 资料的贵州植被叶面积指数的时空变化及其对气候的响应 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 455 - 464.
Dan Li, Xie Ming. 2009. The spatiotemporal variation of leaf area index in Guizhou and its response to climate based on MODIS data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 455 - 464.

基于 MODIS 资料的贵州植被叶面积指数的 时空变化及其对气候的响应

丹利¹ 谢明²

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029

2 贵州毕节地区气象局, 毕节 551700

摘 要 利用 2000~2006 年 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星遥感观测的植被叶面积指数月平均资料以及相应时段的月平均气温、降水的观测资料对贵州植被的时空变化进行了分析。结果表明贵州 2000~2006 年植被分布受水热条件控制表现出对气候因子不同的响应关系, 其中对降水的响应关系比气温明显, 特别是冬季和春季, 而植被在夏季和秋季的分布主要受气温的制约, 与降水的关系并不明显。从季节和年际尺度的时间变化角度而言, 植被对气温的响应比对降水明显, 季节变化和年际变化的相关系数分别为 0.89 和 0.73 (分别通过 99.9% 和 95% 信度检验)。

关键词 叶面积指数 气温 降水 时空响应

文章编号 1006-9585 (2009) 05-0455-10 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

The Spatiotemporal Variation of Leaf Area Index in Guizhou and Its Response to Climate Based on MODIS Data

DAN Li¹ and XIE Ming²

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Bijie Meteorological Bureau of Guizhou Province, Bijie 551700

Abstract Using monthly MODIS remote sensing data of leaf area index during 2000 - 2006 and the observed monthly air temperature and precipitation data, the spatiotemporal variation of vegetation in Guizhou was analyzed. The results show that the spatial pattern of vegetation over Guizhou in the past seven years is controlled by air temperature and precipitation, and presents different response to the climate factors. The response of vegetation distribution to precipitation is more obvious than that to temperature, especially in winter and spring. In summer and autumn, the vegetation growth is mainly dominated by temperature and its relationship with precipitation is not obvious. In view of temporal variations at seasonal and interannual scales, the response of vegetation to temperature is more marked in contrast with that to precipitation, and the correlations coefficients between vegetation and temperature are 0.89 and 0.73, respectively (passing Student *t*-test at 99.9% and 95% confidence levels).

收稿日期 2008-05-18 收到, 2009-05-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40605025、中国科学院知识创新工程领域前沿项目 IAP 07114、财政部/科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200806007

作者简介 丹利, 男, 1973 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事陆气相互作用与气候模拟研究。Email: danli@tea.ac.cn

Key words leaf area index, air temperature, precipitation, spatiotemporal response

1 引言

植被对气候的响应是全球变化研究领域的一个重要方向(温刚等, 2000), 利用植被指数研究植被的时空变化是在全球变化背景下探索植被与气候关系的一个手段(Dan et al., 2007), 王澄海等(2005)利用植被归一化指数 NDVI 研究植被与气候因子的关系并用此指数来确定草原荒漠化的界限, 郭晓寅等(2006)利用 MODIS 的植被净初级生产力资料分析了 2000~2004 年江河源区的植被生产力变化。植被叶面积指数(LAI)是表征植被特征的一个重要变量(Dan et al., 2007), 其定义是投影到单位面积上的叶片总面积, 可以反映出植被生长的动态变化, 特别是在许多全球生态模式或陆面模式, 如 SiB2 (Sellers et al., 1996)、SSiB (Xue et al., 1991)、BATS (Dickinson et al., 1998)、CLM3 (Levis et al., 2004)和 AVIM (Ji, 1995)等, 均采用叶面积指数作为特征参数来描述植被的时空变化。因此研究叶面积指数与气候因子的关系有助于将二者之间的变化规律引入陆面模式, 然后将陆面模式与气候模式耦合(Dan et al., 2005), 最终实现为气候模拟以及植被大气相互作用服务的目的。

贵州地处中国西南腹地, 云贵高原东部, 平均海拔 1100 m 左右, 喀斯特地貌广布, 地势由西向东渐低, 南北两边急剧降入广西和四川盆地; 属亚热带湿润季风气候, 冬无严寒, 夏无酷暑, 大部分地区年均温在 14~18℃, 无霜期始于 2 月中至 3 月初为期 240~320 天, 全年日平均气温都在 0℃以上, 超过 10℃的日数为 200~250 天, 大于 10℃积温为 3500~5500℃, 年降水量 1100~1400 mm (姚永慧等, 2003; 吴俊铭等, 2005)。贵州大尺度的植被对气候的响应研究甚少, 以往少数的研究仅从遥感角度利用 NDVI 对植被进行研究(王冰等, 2006), 而植被叶面积指数的生态学意义更明显(Dan et al., 2005), 因此利用叶面积指数在区域尺度上研究贵州的植被时空变化及其对气候的响应尤为必要。

2 资料介绍

本文所用的植被叶面积指数资料为中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 资料 (Myneni et al., 2007), 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时段为 2000 年 2 月~2006 年 12 月, 可简记为 MODIS LAI, 该资料广泛用于植被与气候相互作用的研究, 如 Tian et al. (2004) 利用 MODIS LAI 进行了全球各种植被类型叶面积指数季节变化的研究。此外, 还使用了美国探路者 AVHRR 1982~2000 年月平均叶面积指数遥感资料 (Myneni et al., 1997), 该资料集空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, AVHRR 的 LAI 资料在全球和中国的植被对气候的响应方面有广泛的应用 (Asner et al., 2003; 丹利等, 2007)。气象资料为 2000 年 2 月~2006 年 12 月的月平均气温和降水观测数据集 (Legates et al., 1990), 空间分辨率也为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 该气象观测数据与中国 740 台站观测气温和降水具有较好一致性。

3 结果及分析

3.1 植被与气温和降水的空间分布格局

图 1 是 2000~2006 年贵州省多年平均的植被叶面积指数、气温和降水以及相应的标准偏差分布。从图 1a 可以看出, 贵州的叶面积指数呈现出东北—西南向的分布型, 从西北角的 $1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 过渡到东北角的 $1.4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 以上; 叶面积指数最大值位于贵州东南角, 与气温和降水有较明显的响应, 特别是对降水的响应更为明显。叶面积指数的标准偏差也是东北—西南向分布型, 从 $0.5 \sim 0.6 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 变化到 $0.8 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 左右 (图 1b)。多年平均的气温分布 (图 1c) 与叶面积指数类似, 也是东北—西南向的分布型, 从 14~15℃变化到 17~18℃; 在西南角地区出现了一个可达 20℃的高温中心, 这与西南角的辐射较强有一定关系 (袁淑杰等, 2007)。气温标准偏差 (图 1d) 则主要是东北西南向梯度, 东端最高气温为

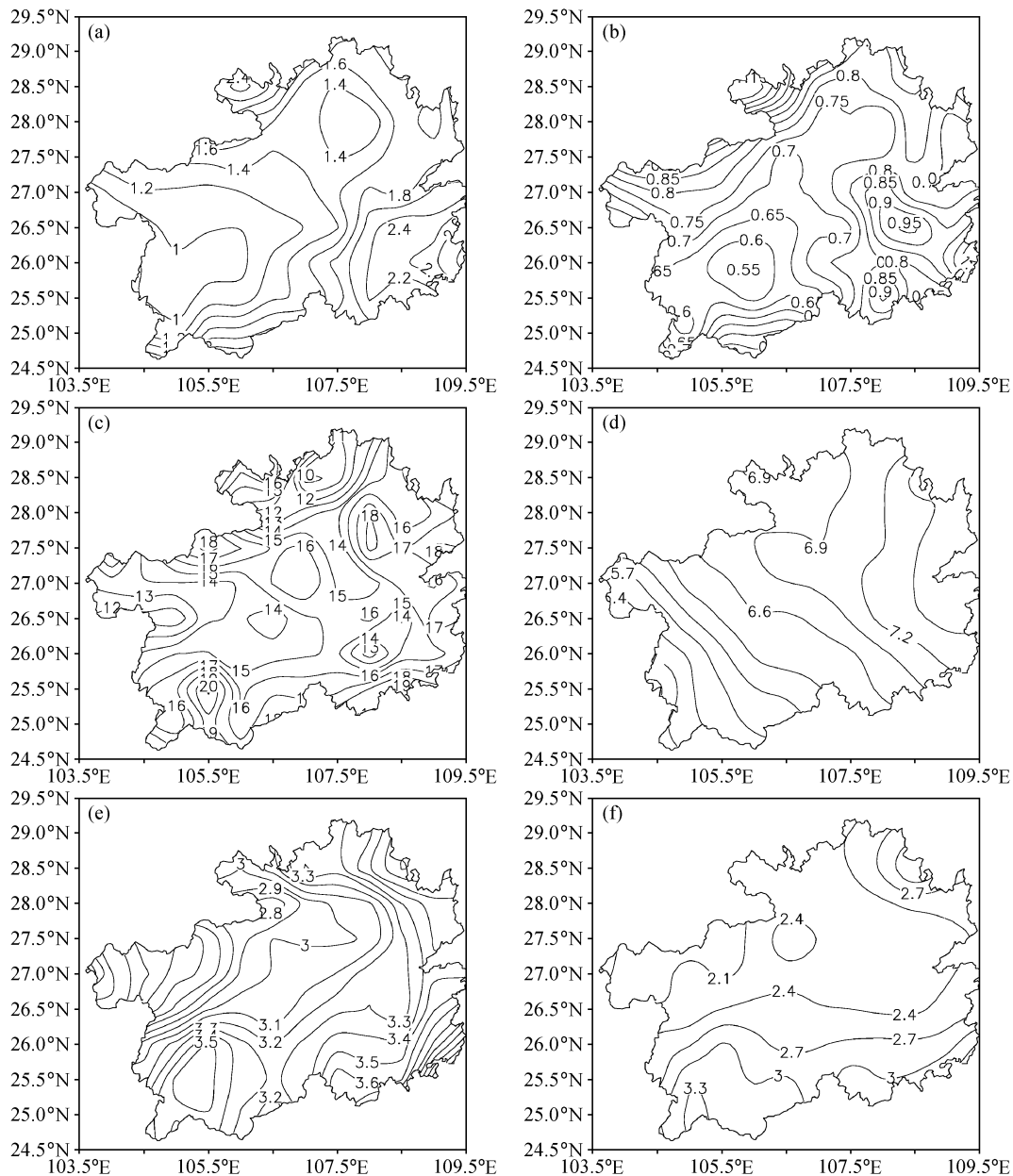


图1 贵州 2000~2006 年的年平均场: (a) 叶面积指数、(b) 叶面积指数标准偏差, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; (c) 气温, (d) 气温标准偏差, 单位: $^{\circ}\text{C}$; (e) 降水、(f) 降水标准偏差, 单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$

Fig. 1 Annual mean (a) leaf area index (LAI), (b) LAI standard deviation (STD) (units: $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), (c) air temperature, (d) air temperature STD (units: $^{\circ}\text{C}$), (e) precipitation, and (f) precipitation STD (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) from 2000 to 2006 in Guizhou

7.5 $^{\circ}\text{C}$, 西端最低为 5.4 $^{\circ}\text{C}$, 东西温差变化可达 2.1 $^{\circ}\text{C}$ 。降水的分布 (图 1e) 同样呈现东北-西南向的特征, 从中部的 3 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 变化到东北和西南两端的 3.5 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 与叶面积指数分布型相似, 在 26 $^{\circ}\text{N}$ 以南分布着高值区。降水的西南角与气温分布型类似也存在一个高值区, 这主要受夏季季风带来的强降水影响 (图 3e)。但叶面积指数在

西南角却没有高值区出现, 根据贵州植被类型分布看 (姚永慧等, 2003), 西南角的植被主要是灌丛、荒地, 因此植被的类型导致了叶面积指数没有出现较高的数值。降水的偏差 (图 1f) 主要是从南至北逐渐减少, 东北-西南向的变化特征不明显。

植被和大气从季节变化的角度来看, 二者的

分布和对应关系各有特点, 下面就叶面积指数、气温和降水的季节变化进行分析。图 2 是冬季(12 月、1~2 月)和春季(3~5 月)植被指数和气象条件的分布。冬季的叶面积指数(图 2a)呈现出明显的由东北向西南减少的特征, 最大值位于贵州东南部; 气温(图 2c)大致是东北-西南向的分布型, 在西南角地区出现一个高值中心; 降

水(图 2e) 则与植被对应, 出现了明显的东北-西南向梯度, 西南部降水为 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 东北部可达 $1.68 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 最大值位于东南角地区, 说明冬季植被的空间分布与降水的对应关系比气温明显, 即植被冬季分布主要受降水条件制约。春季的叶面积指数(图 2b) 分布型与冬季类似, 有一个明显的东北-西南向的梯度, 但数值比冬季明

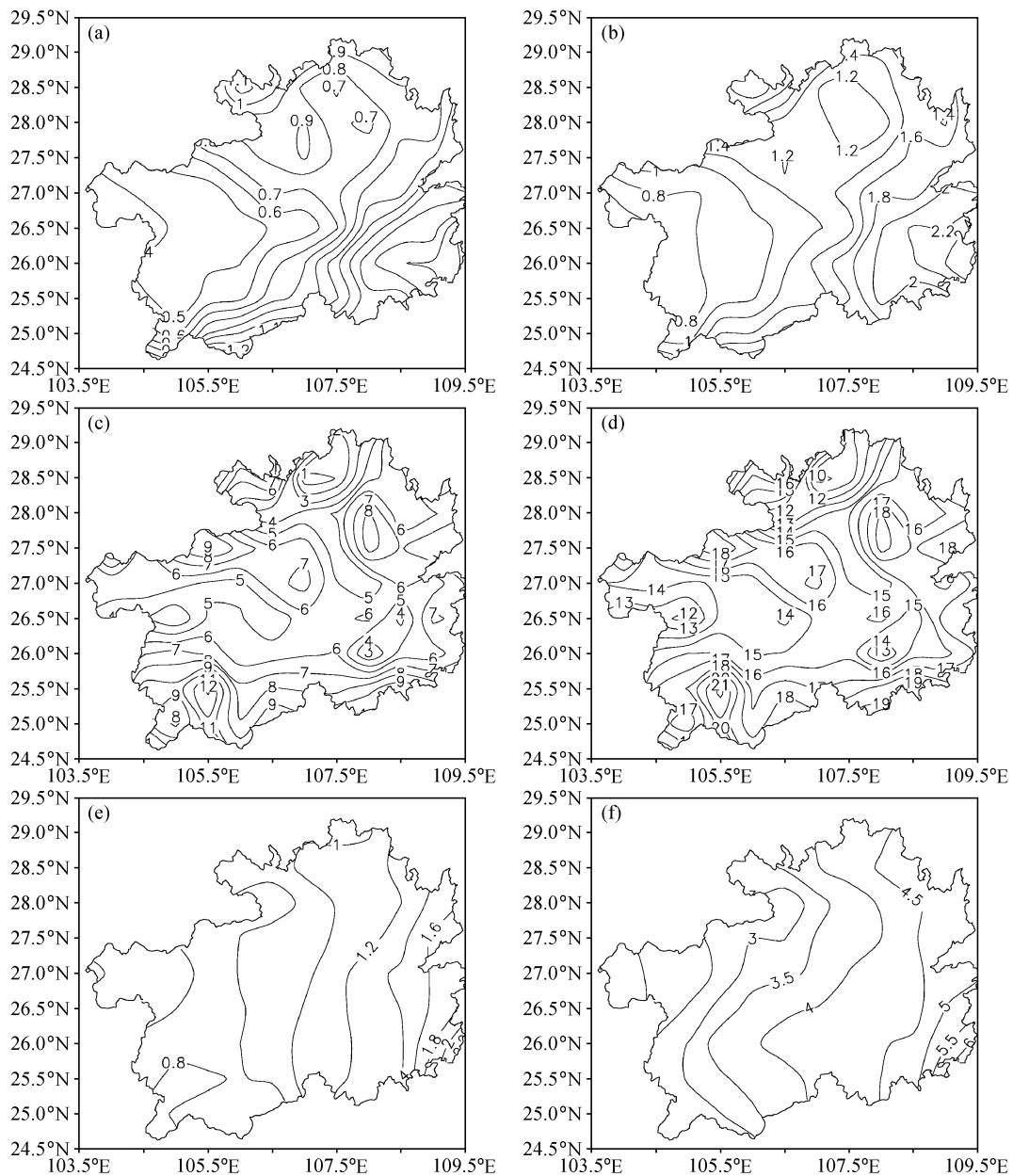


图2 贵州 2000~2006 年冬季和春季的植被、气温和降水分布: (a) 冬季、(b) 春季叶面积指数, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; (c) 冬季、(d) 春季气温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; (e) 冬季、(f) 春季降水, 单位: mm

Fig. 2 (a) winter and (b) spring LAI ($\text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-2}$), (c) winter and (d) spring air temperature ($^{\circ}\text{C}$), (e) winter and (f) spring precipitation (mm) averaged from 2000 to 2006

显增大, 反映植被在春季有了较明显的生长, 在东南角地区仍然分布着一个高值中心; 气温 (图 2d) 也比冬季有了显著的增高, 整个贵州省的气温上升到 12°C 以上, 基本上呈现东北-西南向分布, 与植被的空间对应关系比冬季明显; 降水 (图 2f) 依然是一个明显的东北-西南向的梯度分布, 但降水的强度较冬季明显增强, 整个贵州地

区的降水强度提高了 3~4 倍, 春季植被对降水的响应仍然比气温明显, 此时的降水是植被分布的主要控制因子。

图 3 是夏、秋季植被叶面积指数与气温和降水分布。从夏季叶面积指数 (图 3a) 看, 夏季植被生长旺盛, 叶面积指数达到了最大值, 全省的数值在 $1.8\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 为明显的东北-西南向

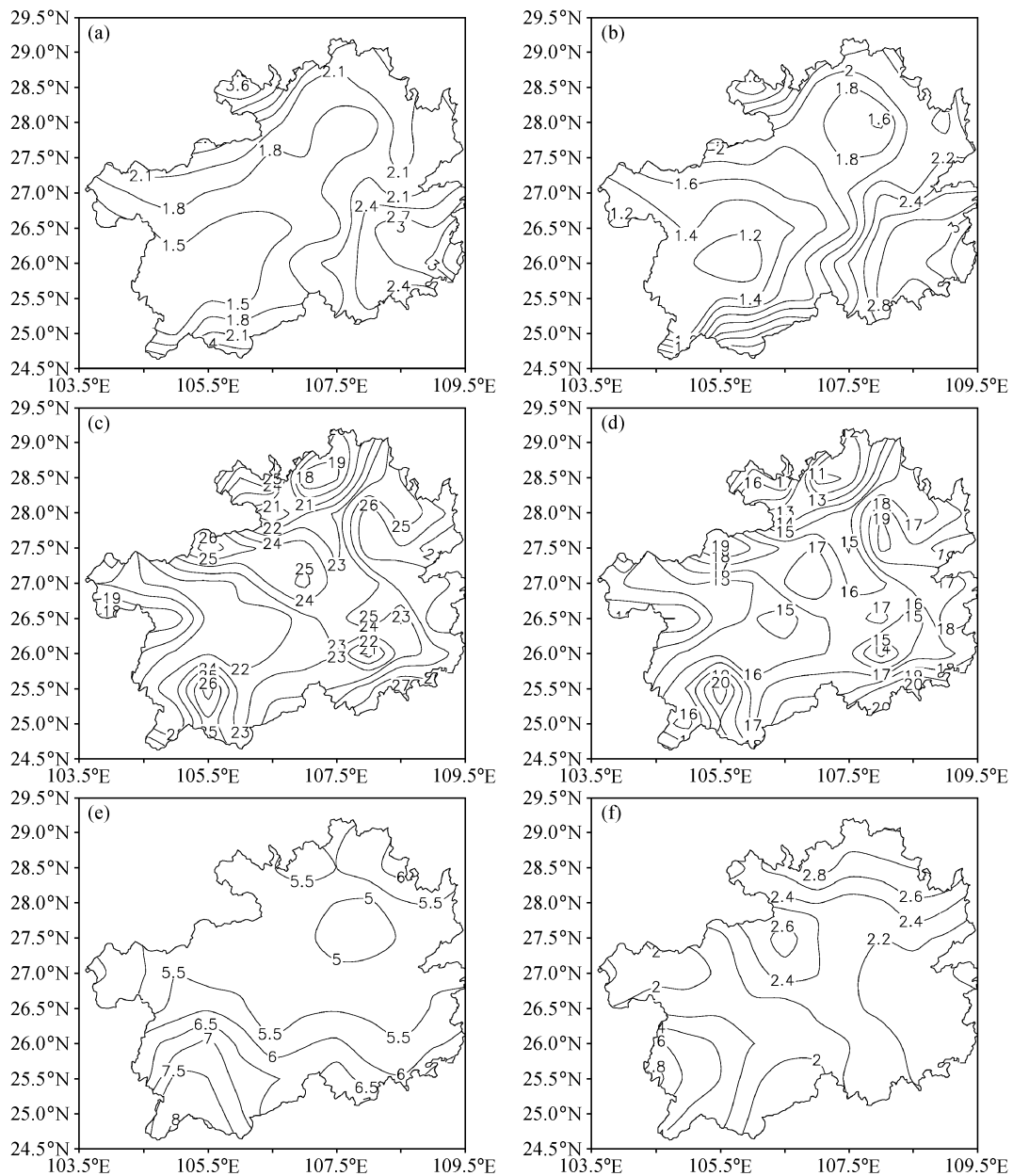


图3 贵州 2000~2006 年: (a) 夏季、(b) 秋季叶面积指数 (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$); (c) 夏季、(d) 秋季气温 (单位: $^{\circ}\text{C}$); (e) 夏季、(f) 秋季降水 (单位: mm) 分布

Fig. 3 (a) Summer and (b) autumn LAI ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), (c) summer and (d) autumn air temperature ($^{\circ}\text{C}$), (e) summer and (f) autumn precipitation (mm) averaged from 2000 to 2006

分布型,从西南部的 $1.5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 逐渐增加到东北部的 $2.1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, 最大值位于东南角地区;夏季的气温(图 2c)总体上也是东南-西北向,但有一些零星分布的中心,在最北端、西南角和东南角分布着一个低中心和两个高中心;降水(图 2e)此时呈现出明显的东北-西南向梯度分布,从西南部的 $6 \sim 8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 减至东北部的 $5.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。植被在夏季与气温有一定的响应关系,而与降水没有明显的响应关系,因为此时的降水量大,植被生长并不受水分条件制约。秋季植被叶面积指数(图 3)与夏季分布类似,但数值有所减小,而西南角与东南角的数值与夏季基本相同;秋季气温(图 3d)与夏季类似,但气温下降明显;降水(图 3f)此时是总体呈现东北-西南向的分布型,西南部的数值可达 $8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 东北部的数值在 $2.4 \sim 2.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 秋季降水相对夏季减少幅度明显,秋季植被与降水的对应仍然不明显,而与气温的分布有一定的对应关系。全年和各个季节的气温分布在贵州全境有一些零星的高低值中心,这与贵州地形高度零星分布的中心(图略)基本对应。

植被全年和各个季节的分布与气候的响应关系见表 1,从年平均角度看,植被依赖降水的关系比气温明显,空间相关系数为 0.51,而植被与气温的相关系数为 0.35;植被对降水的响应主要是在冬季和春季,此时相关系数分别为 0.72 和 0.66;但夏季和秋季的植被在空间分布格局上与降水没有对应关系,主要与气温分布有一定相关,相关系数分别为 0.36 和 0.41,根据植被与气象条

件的关系(温刚等, 2000),可能是因为夏季的降水量太大,对植被的生长并不能起到促进作用,这种影响有可能通过陆面土壤湿度中的记忆而持续到秋季。

表 1 贵州气温和降水与植被叶面积指数的空间相关系数
Table 1 The spatial pattern of correlation coefficients between air temperature, precipitation and LAI in Guizhou

	气温/ $^{\circ}\text{C}$	降水/ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$
冬季	0.26 *	0.72 *
春季	0.29 *	0.66 *
夏季	0.36 *	-0.08 *
秋季	0.41 *	0.08
年平均	0.35 *	0.51 *

注: * 通过 99% 信度检验

3.2 植被与气温和降水的时间变化趋势

为了研究植被叶面积指数与气温和降水在时间演变上的关系,对逐月的叶面积指数与气温和降水分别求相关。从图 4a 可以看出,植被与气温的相关明显,全省的相关系数均在 0.5 以上(通过 99.9% 的信度检验,临界相关系数为 0.355),相关最大的地区是西北角和东南角。在时间变化上,植被与降水的相关不如气温明显,相关系数最大的地区是西北部(通过 99.5% 信度检验,临界相关系数为 0.305),说明在时间演变趋势上,植被主要反映了气温的变化,同时贵州西北部地区对气温和降水的时间变化都比较敏感,在过去 7 年里与气温和降水变化有着较为一致的对对应关系。

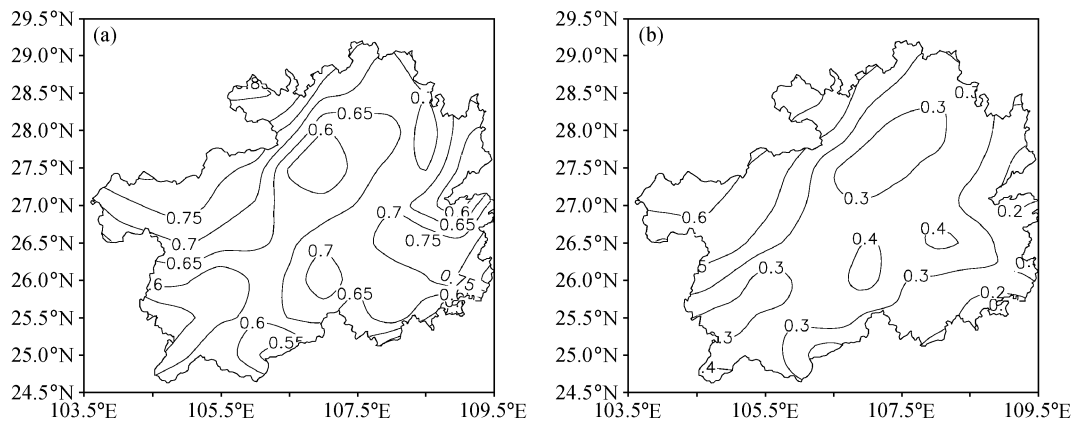


图 4 贵州 2000~2006 年植被叶面积指数与 (a) 气温、(b) 降水相关

Fig. 4 The correlation distributions between LAI and (a) temperature, (b) precipitation during 2000-2006 in Guizhou

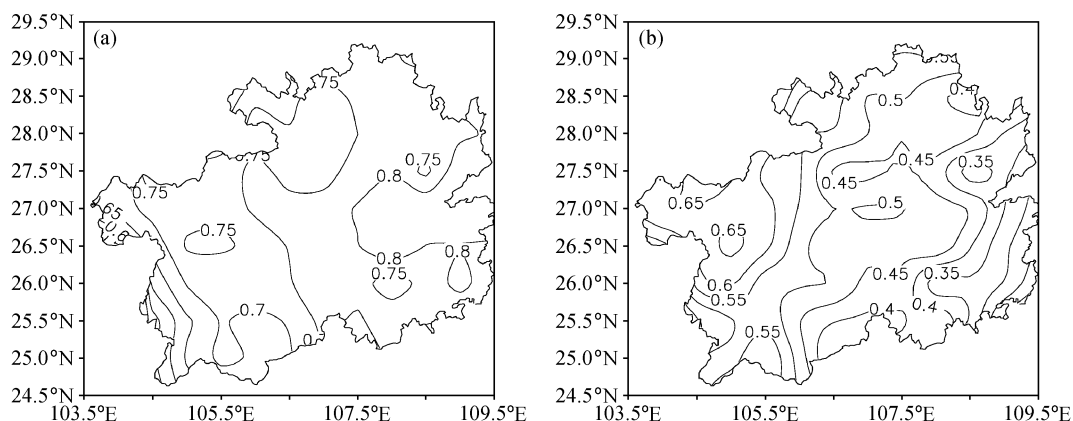


图5 贵州 1982~2000 年 AVHRR 植被指数与 (a) 气温、(b) 降水相关

Fig. 5 The correlation distributions between AVHRR vegetation index and (a) temperature, (b) precipitation during 1982 - 2000 in Guizhou (passing 99.9% confidence level)

为了研究更长时间尺度下的植被叶面积指数对气温和降水的响应,利用 1982~2000 年美国探路者 AVHRR 的月平均叶面积指数遥感资料,以及相同时段内文中所用的观测气温和降水资料对植被与气候因子间的相关进行了分析(相关系数均通过 99.9% 信度检验),结果表明植被与气温和降水的逐月相关分布(图 5)与 2000~2006 年的结果相似,其中东南角的叶面积指数与气温相关系数最大,西北角的叶面积指数与降水相关系数最大。东南部的海拔较低,气温的数值较高,这一关系在叶面积指数数值上有所体现;而降水的东北-西南走向则主要反映了季风的影响,这一影响也在一定程度上反映于植被的分布。

为了考察植被的年变化及其对气候的响应,图 6 给出了贵州省面积平均的叶面积指数、气温和降水多年平均的逐月变化,可以看出叶面积指数在冬季数值较小(在 $1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下),春季开始明显增长,到夏季达到高峰,秋季又开始减小,但与气温和降水不同的是叶面积指数最大值出现在 9 月;气温的年变化以夏季 7 月为中心,出现对称的变化形式,从 1 月逐渐升温到 7 月,然后逐渐降低到 12 月,与植被年变化的相关系数为 0.89,表明植被对气温的响应比较明显。降水的年变化则是以夏季的 6 月为中心,从 1 月逐渐增加到 6 月,然后减小,降水与植被的相关系数为 0.59,二者对应关系不如植被对气温的响应明显。从季节内变化看,从冬到夏,植被和气候的变化一致,呈现出逐渐增长的趋势,但夏到冬,

植被和气候的变化在时间上有 1~2 个月的滞后,最先出现减少的变量依次为降水、气温和植被,说明这一时期水热条件相对较好,植被生长受气候因子的影响较小。

图 7 是 2000~2006 年贵州地区植被与气温、降水的年际变化。从图可以看出在最近 7 年里植被呈现出增加的趋势($R^2=0.35$; R^2 为趋势线拟合程度指标,反映趋势线的估计值与对应实际数据之间的拟合程度,其取值范围在 0~1 之间,值越大拟合程度越高,趋势线的可靠性就越高),从 2000 年增加 2002 年,然后波动上升;气温的年际变化与叶面积指数相似,近 7 年里主要为上升趋势($R^2=0.29$),其中在 2003 年前有明显的上升;降水在近 7 年里却是出现了总体下降的趋势($R^2=0.23$),在 2005 年下降到近 7 年里的最低点,这与最近的研究结果是一致的(吴战平等, 2007),即进入 21 世纪后,贵州处于一个相对的少雨期。总体上来看,植被在年际变化上主要是对气温有明显的响应,而对降水的响应不明显,这从植被与气温和降水的相关系数也能反映出来,叶面积指数与气温的相关系数为 0.73 (通过 95% 信度检验),而与降水的相关系数仅为 0.01,说明在时间演变关系上,对植被起制约作用的主要是气温条件,而降水主要是影响植被的峰值起落。例如 2003 年和 2005 年的叶面积指数为最低值,2004 年为最高值。这一结论与干旱和半干旱地区的植被对大气的响应关系是一致的(丹利等, 2007),说明温度和降水对植被的影响从时间变化

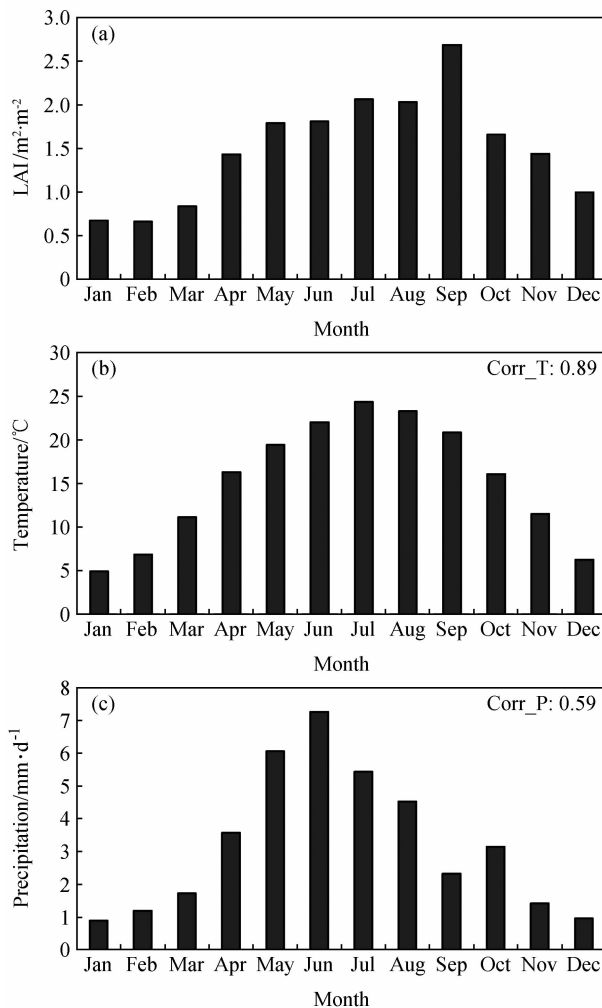


图6 贵州2000~2006年植被与气候因子逐月变化:(a)叶面积指数;(b)气温;(c)降水;(Corr_T为叶面积指数与温度相关系数,通过99.9%信度检验;Corr_P为叶面积指数与降水相关系数,通过95%信度检验)

Fig. 6 The month-to-month variation of vegetation and climate factors during 2000–2006 in Guizhou: (a) LAI; (b) temperature; (c) precipitation (Corr_T is correlation coefficient between LAI and temperature, passing Student *t*-test at 99.9% confidence level; Corr_P is correlation coefficient between LAI and precipitation, passing Student *t*-test at 95% confidence level)

的角度上看,湿润地区和半干旱地区也具有相似之处。

4 结论与讨论

本文使用MODIS遥感得到的最新叶面积指数资料及相应时段的气象观测资料分析探讨了贵州省2000~2006年植被的空间分布,从月、季节到

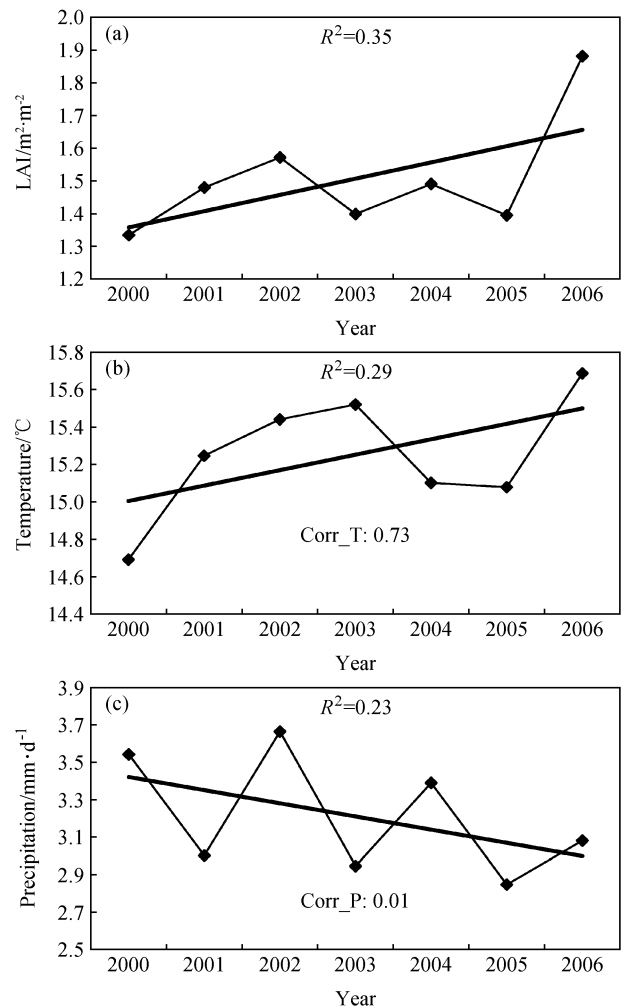


图7 贵州2000~2006年(a)叶面积指数、(b)气温、(c)降水的年际变化(Corr_T为叶面积指数与气温的相关系数,通过95%信度检验;Corr_P为叶面积指数与降水的相关系数)

Fig. 7 The annual variation of (a) LAI, (b) temperature, (c) precipitation during 2000–2006 in Guizhou (Corr_T is 0.73, passing Student *t*-test at 95% confidence level)

年际尺度上分析了植被的变化,以及植被的时空变化与气温和降水的关系。从空间分布看,贵州的植被主要是一个东北-西南向的分布型,与降水的分布对应关系比气温明显,但在各个季节的情况有所不同。植被与降水的空间对应关系在冬季和春季明显,而夏季和秋季不明显,可能的原因是进入夏季后贵州的降水量很大,对植被生长反而起到一种限制作用。植被与气温的空间分布关系是从冬季到秋季相关逐渐增强,秋季到达0.41。从7年里的相关系数分布看,植被与气温的响应

关系比降水明显, 其中贵州西北部地区是一个气候敏感区域, 与气温和降水的相关都比较明显。从时间变化的角度看, 贵州的植被叶面积指数的季节变化与气温和降水都有一定的对应关系, 其中对气温的响应比降水明显, 这一点在年际尺度的变化上更为明显, 植被和气温的相关系数近 7 年为 0.73, 而与降水的相关仅为 0.01。通过本文的分析可以对贵州近 7 年植被对大气的响应关系总结为: 在空间分布上, 植被主要受降水制约; 在季节到年际的时间变化上, 植被主要对气温有明显的响应关系。需要注意的是本文主要从植被响应大气的角度对区域尺度的植被叶面积指数、气温和降水的变化及相互关系进行探讨, 并不考虑地形对气候和植被的影响。从利用 Köppen 气候分区方法 (Xie et al, 2007) 对中国进行气候分区的结果来看, 本文研究的行政区域完全位于同一个气候分区内 (Xie et al., 2007), 整个贵州行政区域同属于一个气候类型区, 因此利用行政区域讨论植被和气候的关系在区域尺度上具有合理性。

参考文献 (References)

- Asner G P, Sculock J M O, Hicke J A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 12: 191–205.
- Dan Li, Ji Jinjun, Li Yinpeng. 2005. Climatic and biological simulations in a two-way coupled atmosphere-biosphere model (CABM) [J]. *Global and Planetary Change*, 47: 153–169.
- Dan Li, Ji Jinjun, He Yong. 2007. Use of ISLSCP II data to intercompare and validate the terrestrial net primary production in a land surface model coupled to a general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D02S90, doi: 10.1029/2006JD007721.
- 丹利, 季劲钧, 马柱国. 2007. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应 [J]. *生态学报*, 27 (9): 3582–592.
- Dan Li, Ji Jinjun, Ma Zhuguo. 2007. The variation of net primary production and leaf area index over Xinjiang Autonomous Region and its response to climate change [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 27 (9): 3582–3592.
- Dickinson R E, Shaikh M, Bryant R, et al. 1998. Interactive canopies for a climate model [J]. *J. Climate*, 11: 2828–2835.
- 郭晓寅, 何勇, 沈永平, 等. 2006. 基于 MODIS 资料的 2000~2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析 [J]. *冰川冻土*, 28 (4): 512–518.
- Guo Xiaoyin, He Yong, Shen Yongping, et al. 2006. Analysis of the terrestrial NPP based on the MODIS in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers from 2000 to 2004 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 28 (4): 512–518.
- Ji Jinjun. 1995. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. *Journal of Biogeography*, 22: 445–451.
- Legates D R, Willmott C J. 1990. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected global precipitation [J]. *International Journal of Climatology*, 10: 111–127.
- Levis S, Bonan G B, Vertenstein M, et al. 2004. The community land model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide [R]. NCAR/TN-459 + IA, NCAR Technical Note.
- Myneni R B, Nemani R R, Running S W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35 (6): 1380–1393.
- Myneni R B, Yang W, Namani R R, et al. 2007. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests [J]. *Proceeding of the National Academy of Science*, 104 (12): 4820–4823.
- Sellers P J, Randall D A., Collatz G J, et al. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. *J. Climate*, 9: 676–705.
- Tian Y, Dickinson R E, Zhou L, et al. 2004. Comparison of seasonal and spatial variations of leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Common Land Model [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D01103, doi: 10.1029/2003JD003777.
- 王冰, 杨胜天. 2006. 基于 NOAA/AVHRR 的贵州喀斯特地区植被覆盖变化研究 [J]. *中国岩溶*, 25 (2): 157–162.
- Wang Bing, Yang Shengtian. 2006. Change in vegetation cover in Guizhou karst regions based on NOAA/AVHRR [J]. *Carsologica Sinica (in Chinese)*, 25 (2): 157–162.
- 王澄海, 惠小英. 2005. 以植被指数 0.12 为指标看我国的荒漠化与草原界限的变化 [J]. *中国沙漠*, 25 (1): 88–92.
- Wang Chenghai, Hui Xiaoying. 2005. Borderline variations of desertification and grassland over China viewed from NDVI 0.12 [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 25 (1): 88–92.
- 温刚, 符淙斌. 2000. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的尺度特征: 多年平均结果 [J]. *大气科学*, 24 (5): 676–682.
- Weng Gang, Fu Congbin. 2000. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: Multi-year average results [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (5): 676–682.
- 吴俊铭, 谷晓平, 徐丹丹. 2005. 论贵州农业气候资源优势及其利用 [J]. *贵州气象*, 29 (3): 3–5.
- Wu Junming, Gui Xiaoping, Xu Dandan. 2005. On resource strength of agro-climate over Guizhou and its utilization [J]. *Journal of Guizhou Meteorology*

- (in Chinese), 29 (3): 3-5.
- 吴战平, 许丹. 2007. 贵州气候变化的科学事实 [J]. 贵州气象, 31 (4): 3-4. Wu Zhanping, Xu Dan. 2007. The scientific basis of climate change in Guizhou [J]. Journal of Guizhou Meteorology (in Chinese), 31 (4): 3-4.
- Xie Zhenhui, Yuan Fei, Duan Qingyun, et al. 2007. Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China [J]. Journal of Hydrometeorology, 8: 446-468.
- Xue Y, Sellers P J, Kinter J L, et al. 1991. A simplified biosphere model for global climate studies [J]. J. Climate, 4: 345-364.
- 姚永慧, 张百平, 周成虎, 等. 2003. 贵州森林的空间格局及组成结构 [J]. 地理学报, 58 (1): 126-132. Yao Yonghui, Zhang Baining, Zhou Chenghu, et al. 2003. Spatial pattern and component structure of forests in Guizhou [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (1): 126-132.
- 袁淑杰, 谷小平, 缪启龙, 等. 2007. 基于 GIS 的起伏地形下天文辐射分布式模型—以贵州高原为例 [J]. 山地学报, 25 (5): 577-583. Yuan Shujie, Gu Xiaoping, Miao Qilong, et al. 2007. Distributed models of astronomical solar radiation over rugged terrains based on GIS [J]. Journal of Mountain Science (in Chinese), 25 (5): 577-583.