

基于 MODIS 的陕西省叶面积指数时空变化特征分析

董金芳¹,袁媛²,何慧娟¹,高蓓¹

(1. 陕西省农业遥感信息中心,陕西 西安 710014;2. 陕西省气象台,陕西 西安 710014)

摘要:叶面积指数(LAI)作为表征植被冠层的重要参数,在定量分析陆地生态系统能量交换中具有重要意义。利用 MODIS 叶面积指数产品,结合地表覆盖分类数据,对 2001—2014 年陕西省 LAI 进行了监测。结果表明:1)陕西省 LAI 最大值平均总体呈波动中上升趋势,年内变化呈现明显的季节差异。2)陕北地区 LAI 上升趋势明显,年际波动较大,渭北塬区以及陕南东部部分区域 LAI 呈上升趋势,但年际间变化不大,其他区域 LAI 年际间变化趋势和波动均不明显。3)陕西省范围内典型植被类型 LAI 最大值平均年际变化均呈现上升趋势,但年内变化曲线各不相同。退耕还林、植树造林等生态工程是陕西省 LAI 上升的主要原因,气候因素是 LAI 产生波动的直接原因。反映了陕西省植被群体结构空间分布以及变化特征,为进一步陆地生态系统研究提供了重要参数。

关键词:MODIS;叶面积指数;时空分布;陕西省

中图分类号:S718.556 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)03-0079-07

Analyses of Spatial-temporal Changes of Leaf Area Index in Shaanxi Province Based on MODIS

DONG Jin-fang¹,YUAN Yuan²,HE Hui-juan¹,GAO Bei¹

(1. Shaanxi Remotes Sensing Information Center for Agriculture,Xi'an,Shaanxi 710014,China;

2. Shaanxi Province Meteorological Observatory,Xian,Shaanxi 710014,China)

Abstract:As a crucial parameter to characterize the canopy structure,leaf area index (LAI) exhibited significance in analyzing energy exchanges within terrestrial ecosystem. In this study,a spatial-temporal changes of LAI analysis in Shaanxi Province from 2001 to 2014 was conducted. The MODIS products were applied to generate LAI series in Shaanxi Province during the period of 2001 to 2014. By employing the land cover map,the LAI series of four typical vegetation types were also derived. The results indicated that:1) The spatial pattern of LAI showed obviously distinct spatial and seasonal variations. The inter-annual mean of maximum LAI showed an increasing trend during 2001—2014. 2) The annual LAI in Northern Shaanxi from 2001 to 2014 increased and interannual fluctuation changed significantly. The annual LAI in Weibei dry highland and the east of Southern Shaanxi increased with small interannual fluctuation change. The annual LAI in regions had un conspicuous trend and interannual fluctuation. 3) The inter-annual mean of maximum LAI among different vegetation types in Shaanxi Province increased from 2001 to 2014. It was pointed out that the monthly LAI variations of four vegetation types were in single peak pattern with variations. The increasing trend was primarily reflecting afforestation and reforestation and the fluctuation was directly linked to climatic factors. The research results reflected the spatial distribution and variation characteristics of the vegetation in Shaanxi Provance and had important significance for the further study of terrestrial ecosystem.

收稿日期:2015-07-01 修回日期:2015-10-26

基金项目:陕西省气象局创新基金(M2013-17)。

作者简介:董金芳,女,在读硕士,工程师,研究方向:遥感生态环境监测。E-mail:chinaren.djf@163.com

Key words: MODIS; leaf area index (LAI); temporal and spatial change; Shaanxi

叶面积指数(leaf area index, LAI)是描述植被叶面覆盖情况的无量纲参数,通常定义为单位面积地表上叶片总面积的 $1/2^{[1-2]}$ 。叶面积指数与植被的蒸腾、光合作用和呼吸等生物过程密切相关^[3-4],在陆地表面蒸散、农作物长势、产量估算、碳蓄积量、水土保持等方面得到广泛应用^[5-9]。

目前叶面积指数的获取方法主要有地面测量法和遥感测量法^[10]。地面测量叶面积指数的方法精度高,但由于工作量大、破坏性强、时间连续性差等局限性,应用范围受到很大限制,遥感测量法利用卫星遥感影像建立统计关系或物理模型进行叶面积指数估算^[11-14],是用于开展大面积长时间序列叶面积指数最常用的方法^[15-19]。利用 2001—2014 年 MODIS 叶面积指数产品,分析叶面积指数的年际和年内空间格局变化特征,并结合地表覆盖分类数据分析不同植被类型叶面积指数的变化特征,以期得到陕西省叶面积指数的变化规律及其影响因素,为陕西省植被—大气相互作用模型、碳循环和水循环模型等生态模型研究提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省地处我国西北地区东部($105^{\circ}29'E-111^{\circ}15'E$ 、 $34^{\circ}42'N-39^{\circ}35'N$),东西窄,南北长,纬度跨度大,境内南北气候差异较大。其中榆林北部长城沿线风沙区以北为温带干旱半干旱气候,榆林南部、延安市以及关中平原为暖温带半湿润气候、陕南谷地为北亚热带湿润气候,秦巴山区则大部分为暖温带湿润气候。地势由西向东倾斜,南北高,中间低。多年平均气温 $7\sim 16^{\circ}C$,多年平均降水量 $310\sim 1\,274\text{ mm}$,总体气温和降水均呈现出由北到南增加的趋势^[20],水热条件南部较为优越,北部较差。区域内自然资源丰富,植被种类众多,在气候、地理条件、人类活动等多重因素的影响下,植被种类具有明显的空间分布差异^[21]。

1.2 数据来源

叶面积指数数据采用美国国家航空航天局(ladsweb.nascom.nasa.gov/)提供的 MODIS/Terra 卫星 4 级 8 d 合成陆地产品 MOD15A2,时间跨度为 2001—2014 年,囊括陕西省范围的卫星轨道号为 h26v05 和 h27v05。MOD15A2 数据格式为 HDF,正弦曲线投影,空间分辨率为 1 km ,主要包括叶面积指数、光合有效辐射分量、质量评价等数据集。

土地覆盖数据采用 2008 年 MODIS/Terra&Aqua 第 3 级土地覆盖数据 MCD12Q1,空间分辨率为 500 m ,陕西省范围的轨道号、投影方式、数据格式均与叶面积指数产品 MOD15A2 相同。MODIS 土地覆盖产品采用国际地圈生物圈计划(IGBP)分类方案,将土地覆盖类型分为:常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、郁闭灌丛、稀疏灌丛、多树草原、稀树草原、草地、永久湿地、农田、城市和建筑用地、农田/自然植被混合、冰雪、裸地或低植被覆盖区域、水体等 17 类。

1.3 数据处理

利用 NASA 网站提供的投影转换工具 MODIS Reprojection Tool(MRT)对 h26v05 和 h27v05 两个数据文件进行转投影、拼接等操作,提取 MOD15A2 数据集中的叶面积指数和 MCD12Q1 中的分类数据,并存储为 WGS84 经纬度投影、Geo-Tiff 格式的数据文件,在地理信息系统处理平台 ARCGIS 10.1 的支持下按照陕西省边界对叶面积指数和地表覆盖分类数据进行裁切,并将栅格格式的地表覆盖分类数据转换为矢量格式。

在遥感图像处理平台 ENVI 4.8 和数据可视化语言 IDL 8.0 的支持下,对叶面积指数数据进行逐年、逐月合成,为了尽量降低云层、气溶胶、太阳高度角等因素对数据质量的影响,采用最大值提取的方法,完成叶面积指数月、年叶面积指数提取,并将年内叶面积指数月值平均作为年平均叶面积指数。利用 ARCGIS 10.1 空间分析功能,完成不同地表覆盖类型叶面积指数统计。

利用线性倾向估计($y = bx + a$)对叶面积指数变化趋势进行分析,线性倾向值 b 计算公式如下:

$$b = \frac{[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i]}{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2]} \quad (1)$$

利用变异系数(Coefficient of Variance, CV)表述叶面积指数年际变化, CV 计算公式如下:

$$CV = \sqrt{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1) / \bar{y}} \quad (2)$$

式中: $n=14$, 代表 2001—2014 的年数, x_i 代表年份 $(1, 2, \dots, 14)$, y_i 代表陕西省第 i 年叶面积指数, \bar{y} 代表 2001—2014 年陕西省叶面积指数平均值。 b 值反映了叶面积指数的变化趋势, $b > 0$ 时, 表示叶面积指数随时间增加的呈上升趋势, 且 b 越大, 叶面积指数增加速度越快, $b < 0$ 时, 表示叶面积指数随时间增加呈下降趋势, 且 $|b|$ 越大, 叶面积指数减少速度越快。 CV 值反映了叶面积指数的年际波进程

度, CV 值越大, 表示叶面积指数年际间变化越大, 反之, CV 值越小, 表示叶面积指数年际间变化较小, 较为平稳。

2 结果与分析

2.1 陕西省 LAI 时间变化分析

由于地形、纬度、地物覆盖类型等因素的差异, 在不同季节, 叶面积指数空间分布差异性不同(图1), 1月代表冬季, 是一年中气温最低、降水最少的季节, 陕西省范围内叶面积指数空间差异不大, 整体处于低值期, 全省平均值为0.30。4月代表春季, 太阳直射点向北回归线移动, 气温逐渐上升, 降雨量增加, 全省叶面积指数平均值为1.08, 较冬季有所增加, 增幅空间分布不均匀, 叶面积指数的空间差异性开始显露, 具体表现为: 陕南地区叶面积指数最高, 在1.2~2.0之间, 秦岭南麓部分低海拔林区甚至达到了3.0以上, 其次是关中地区, 在0.9~1.5之间, 这是因为关中平原是陕西省冬小麦的主要种植区, 4月份正值冬小麦返青拔节期, 生长量大, 叶面积指数较高。延安南部黄龙山、子午岭林区, 由于地理位置等因素的影响, 叶面积指数较陕南林区低, 在0.8~1.5之间, 榆林市和延安市北部叶面积指数较冬季上升幅度较小, 值在0.2~0.6之间。7月代表夏季, 是一年中气温最高, 降水最为充沛的季节, 全省叶面积指数平均值为2.7, 达到了全年的最大值, 同时最大程度展现了叶面积指数的空间分布差异, 其中高值区域主要集中在延安市南部黄龙山、子午岭林区, 宝鸡北部关山林区和秦巴山地, 值在5.0~6.0之间, 其中秦巴山区高值区范围最大。低值区域主要位于陕北地区, 其中榆林北部长城沿线风沙区内除无定河河谷绿洲部分区域叶面积指数能达到1.0以上, 其余区域叶面积指数在0.4~0.6之间, 榆林南部和延安北部的黄土高原丘陵沟壑区叶面积指数在0.5~1.0之间。关中地区由于部分区域正值夏玉米苗期, 使得叶面积指数较4月有所下降, 主要集中在渭河沿岸和西安市东南部, 总体与陕南汉江谷地叶面积指数持平, 在1.1~1.8之间, 属于次低值区域。10月代表秋季, 此时气温逐渐下降, 大部分植被进入落叶期, 叶面积指数也随之降低, 叶面积指数平均值为1.3, 与春季叶面积指数相当, 但空间分布特征较春季有所不同, 主要表现在延安南部和秦巴山区等大部分高值区域叶面积指数值均高于春季4月份水平, 陕北低值区域叶面积指数也较春季高0.1~0.3, 关中地区和汉江谷地等农作物种植聚集区由于大部分农作物已进入收获期, 冬小麦、油

菜进入播种期, 部分区域叶面积指数较4月份有所降低, 下降幅度在0.4~1.2之间。

2001—2014年陕西省叶面积指数最大值平均年际变化呈现出在波动中上升的趋势(图2), 波动范围为2.69~3.37, 总体上升趋势明显, 多年平均值为3.10, 其中最小值在2001年, 为2.75, 最大值在2013年, 为3.37。陕西省叶面积指数最大值平均随时间变化线性回归方程系数为0.037, 回归方程满足 $p < 0.001$ 的显著性检验。

2001、2009、2014年叶面积指数最大值平均明显低于叶面积指数的线性回归模拟值, 这3年气候的共同点是干旱灾害, 同时夏季气温偏高, 高温日数偏多。2001年春夏连旱, 其中7月中旬, 全省大部分区域降水量不足常年同期的50%, 干旱灾情严重, 林业损失高达50%; 2008—2009年陕西省秋冬连旱林木受旱面积高达6.9万 hm^2 , 干旱程度30 a一遇; 2014年夏季关中、陕南降水量同期偏少40%~80%, 旱情持续时间长, 范围广。2001年关中35℃以上高温天气持续长达20 d, 7月上旬大部分地区平均气温偏高3~4℃; 2009年夏季陕北东部、关中以及陕南东部出现持续、大范围高温天气, 全省44个高温日; 2014年夏季共46个高温日, 关中、陕南均出现持续12 d的高温天气。

2.2 陕西省 LAI 空间分布变化分析

2001—2014年陕西省叶面积指数平均值变化存在显著的空间分布差异(图3(a)), 叶面积指数上升的区域在陕北地区较为集中, 其中榆林北部风沙区叶面积指数每年上升幅度较小($< 0.01 \text{ a}^{-1}$)以下, 榆林东南部、延安市北部以及北洛河河谷地区叶面积指数线性倾向值较大, 在0.01~0.03 a^{-1} , 上升较为迅速, 部分区域上升速度 $> 0.03 \text{ a}^{-1}$ 。铜川市、咸阳北部、宝鸡北部以及渭南市北部地区叶面积指数呈上升趋势的区域相对较为分散, 叶面积指数线性倾向值在0.01~0.02 a^{-1} 之间。渭河南岸部分区域叶面积指数呈下降趋势, 降幅在0.01~0.02 a^{-1} 之间, 西安市周边部分区域降幅达0.03 a^{-1} 以上。陕南大部分区域变化趋势不显著, 商洛市、安康中部以及汉中中部部分区域呈现上升趋势, 少部分河谷区域呈现下降趋势。

2001—2014年陕西省叶面积指数平均值变异系数空间分布(图3(b)), 变异系数高值区域主要集中在榆林西南部、延安北部, $CV > 0.2$, 部分区域达到了0.3以上, 年际波动幅度较大, 结合图2(a)可知, 陕北地区 CV 值主要是因为叶面积指数呈现显著地上升趋势。黄龙山子午岭分水岭北洛河河谷区

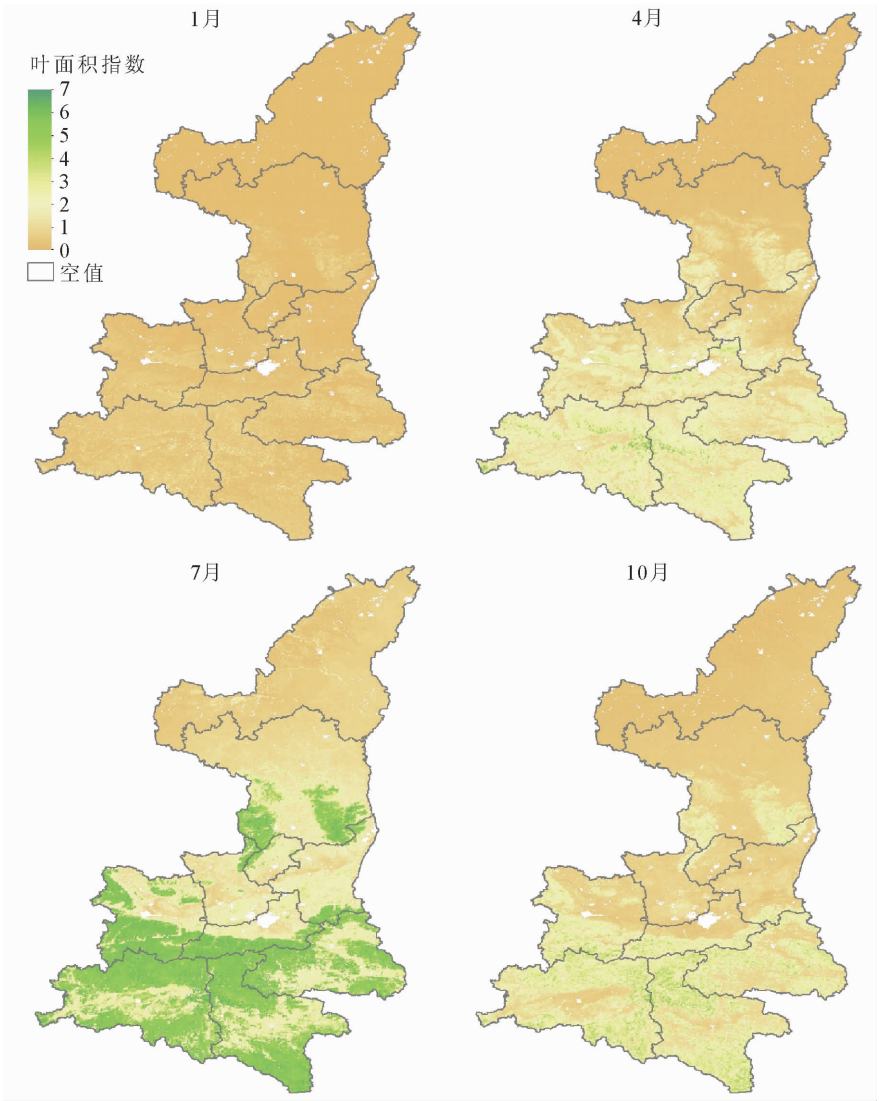
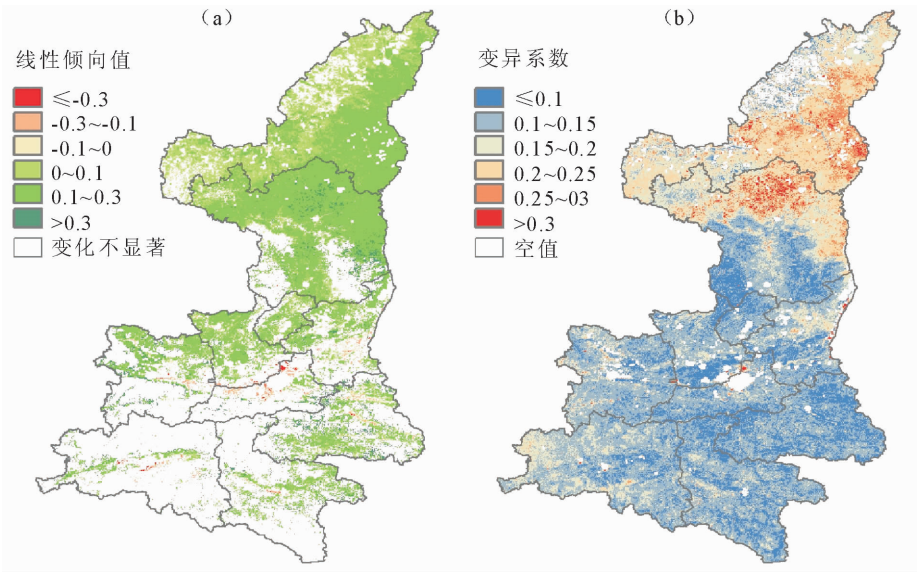


图 1 陕西省 2001—2014 年 1、4、7、10 月叶面积指数最大值平均空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of average maxium LAI in Shaanxi Province for January, April, July, and October during 2001 to 2014



注：(a) 线性变化趋势；(b) 变异系数

图 3 2000—2014 年陕西省叶面积指数变化空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the changes of LAI in Shaanxi Province during 2001 to 2014

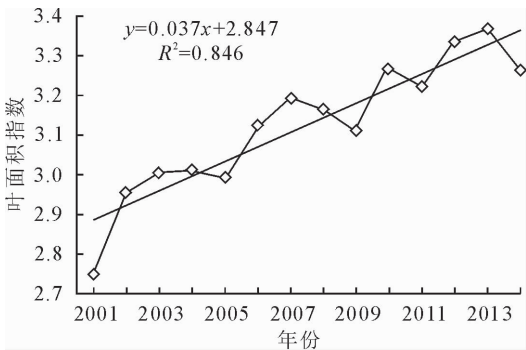


图 2 陕西省 2001—2014 年叶面积指数(LAI)最大值平均年际变化

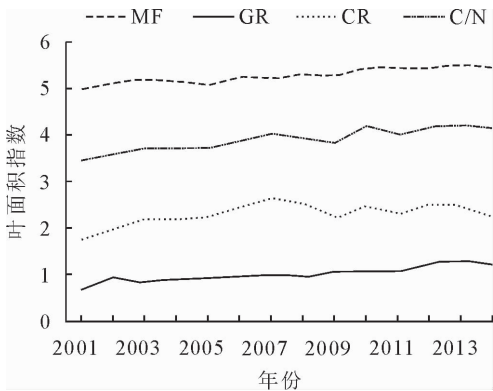
Fig. 2 Inter-annual average of maxium LAI in Shaanxi Province during 2001 to 2014

域,渭南东北部区域为次高值区域,CV0.15~0.25,对应图 2(a),均为叶面积指数上升的缘故。延安南部黄龙山、子午岭林区、关中、陕南大部分区域虽然叶面积指数有一定的上升或下降趋势,但年际波动幅度较小,变异系数 0.1 左右,叶面积指数长年表现相对较为平稳。

2.3 不同植被类型的 LAI 变化特征

根据 2008 年 MCD12Q1 分类数据结果统计,混交林(34.8%)、草地(31.5%)、农田(21.4%)和农田/自然植被混合(5.6%)4 种植被类型占陕西省总面积的 93.3%,故选取此 4 种典型植被类型进行分析。2001—2014 年叶面积指数最大值平均年际变化(图 4 和表 1)表明,4 种植被类型叶面积指数总体均呈现上升趋势,农田线性回归系数满足 $p<0.02$

的 t 检验,其余三类均满足 $p<0.001$ 的 t 检验。其中农田/自然植被混合区域叶面积指数上升速度最快,为 0.053 a^{-1} 。混交林和草地次之,为 0.036 a^{-1} ,农田叶面积指数上升速度最慢,为 0.034 a^{-1} 。不同植被类型叶面积指数差异显著,混交林叶面积指数多年最大值平均为 5.28,值最高,波动范围最小,为 5~5.52,年际间变化相差不大,标准差为 0.16。农田/自然植被混合多年最大值平均次之,为 3.9,波动范围在 3.45~4.22 之间。农田叶面积指数多年最大值平均为 2.29,波动范围在 1.74~2.62,波动范围较大。草地叶面积指数波动范围在 0.68~1.31 之间,多年最大值平均为 1.02,在 4 种植被类型中叶面积指数最低。



注:MF:混交林;GR:草地;CR:农田;C/N:农田/自然植被混合。以下同。

图 4 2001—2014 年不同植被类型 LAI 最大值平均年际变化

Fig. 4 Inter-annual average of max LAI in different vegetation types during 2001 to 2014

表 1 2001—2014 年不同植被类型 LAI 统计

Table 1 Statistic of LAI in different vegetation types during 2001 to 2014

| 类别 | 最小值 | 最大值 | 均值 | 标准差 | 线性倾向值 | 决定系数 R |
|-----|------|------|------|------|-------|--------|
| MF | 5.00 | 5.52 | 5.28 | 0.16 | 0.036 | 0.864 |
| C/N | 3.45 | 4.22 | 3.90 | 0.24 | 0.053 | 0.856 |
| CR | 1.74 | 2.62 | 2.29 | 0.24 | 0.034 | 0.377 |
| GR | 0.68 | 1.31 | 1.02 | 0.17 | 0.036 | 0.831 |

2001—2014 年 4 种典型植被类型叶面积指数最大值平均月变化曲线(图 5)中,混交林、草地、农田/自然植被混合年内变化呈现单峰型变化趋势,农田叶面积指数呈现双峰型变化趋势,5 月有 1 个小波峰,7、8 月有 1 个更高值的波峰。混交林叶面积指数在 4、5 月迅速升高,在 7 月达到最大值 4.8,从 8 月开始叶面积指数逐渐降低,11 月降至 1 以下,下降速度变缓,冬季叶面积指数变化不大。农田/自然植被混合区域叶面积指数年内变化趋势与混交林大体一致,11、12、1—4 月与混交林叶面积指数相差不大,5 月以后开始明显低于混交林叶面积指数,7 月

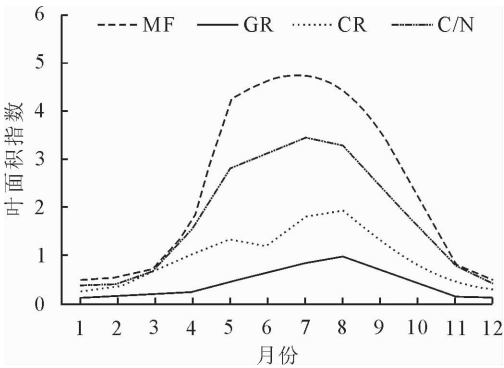


图 5 2001—2014 年不同植被类型 LAI 最大值平均月变化

Fig. 5 Monthly average of maxium LAI in different vegetation types during 2001—2014

农田/自然植被混合叶面积指数达到最大值 3.4,8 月叶面积指数小幅下降,9 月以后叶面积指数显著下降,至 11 月降至 1 以下。草地叶面积指数从 2 月开始就呈现缓慢上升趋势,4 月以后上升速度加快,并保持上升速度至 8 月达到最大值 1 左右,9 月以后呈匀速下降趋势,11 月降至 0.2 以下,下降速度变缓,12 月、1 月继续下降,但幅度很小。

3 结论与讨论

2001—2014 年陕西省叶面积指数呈现波动中上升趋势,叶面积指数具有明显的时空分布差异,冬季陕西省范围内叶面积指数空间差异最小,春秋季节次之,夏季下垫面不同导致的叶面积指数空间异质性体现的最为突出。陕西省 LAI 时间变化特征这可能是因为自 1998 年以来陕西省大规模大范围内实施退耕还林工程,成效显著,植被覆盖度大幅提升,叶面积指数也随之增长^[22]。不同植被类型的 LAI 变化特征与陕西省大力开展退耕还林工程有着密切的关系。农田叶面积指数多年最大值波动范围较大,可能是由于农作物轮耕轮作等因素的影响。

在高温和干旱的胁迫下,植物的光合生产力显著降低^[23],进而导致叶面积指数下降。陕西省叶面积指数年际变化空间分布呈现的地带性特征与陕西省生态功能区划密切相关,在退耕还林、天然林保护、自然保护区建设等一系列生态环境保护工作的影响下,黄土高原农牧生态区和长城沿线风沙草原生态区叶面积指数明显提高,渭河谷地农业生态区北部和秦巴山地落叶阔叶、常绿阔叶混交林生态区东部以及汉江谷地部分区域叶面积指数也在不断上升,同时由于经济的发展使得城市不断扩张,关中城市群周边部分区域植被有退化迹象。

混交林、草地、农田和农田/自然植被混合 4 种陕西省范围内典型植被类型叶面积指数年际和年内变化差别显著,农田叶面积指数呈现双峰型变化趋势,5 月有 1 个小波峰,7、8 月有 1 个更高值的波峰,这可能是因为冬小麦特殊的生长周期,6 月冬小麦进入收获期,导致农田叶面积指数下降,形成了 1 个小波谷。年际变化反映了气候以及人类活动对植被的影响,年内变化反应了植被的生长轨迹,为掌握作物生长,监测物候具有重要的作用,同时不同植被类型叶面积指数的差异性也为遥感影像分类提供了理论依据。

参考文献:

[1] CHEN J M,RICH P M,GOWER S T,et al. Leaf area index of boreal forests;theory,techniques,and measurements[J]. Jour-

nal of Geophysical Research: Atmospheres,1997,102(D24): 29429-29443.

[2] CHEN J M,BLACK T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant,Cell & Environment,1992,15(4):421-429.

[3] SPRINTSIN M,COHEN S,MASEYK K,et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2011,151(5): 565-574.

[4] BONAN G B. Forests and climate change:forcings,feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science,2008,320 (5882):1444-1449.

[5] 刘胜,贺康宁. 基于 Penman-Monteith 模型的林木日蒸腾模拟 [J]. 西北林学院学报,2006,21(3):15-20.

LIU S,HE K N. Modeling of the daily forestry transpiration variation based on Peman-Monteith model [J]. Journal of Northwest Forestry University,2006,21(3):15-20. (in Chinese)

[6] 胡良军,邵明安. 论水土流失研究中的植被覆盖度量指标[J]. 西北林学院学报,2001,16(1):40-43.

HU L J,SHAO M A. Vegetation coverage index in soil and water loss studies[J]. Journal of Northwest Forestry University,2001,16(1):40-43. (in Chinese)

[7] 林伟,郑博福,胡理乐,等. 井冈山森林碳储量与 LAI 和材积的相关性[J]. 生态环境学报,2012,20(12):1831-1835.

LIN W,ZHENG B F,HU LL,et al. Relationship among carbon storage of forest,LAI and volume in Jinggangshan[J]. Ecology and Environmental Sciences,2012,20(12):1831-1835. (in Chinese)

[8] 黄敬峰,陈拉,王秀珍. 水稻生长模型参数的敏感性及其对产量遥感估测的不确定性[J]. 农业工程学报,2012,28(19):119-129.

HUANG J F,CHEN L,WANG X Z. Sensitivity of rice growth model parameters and their uncertainties in yield estimation using remote sensing date[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(19):119-129. (in Chinese)

[9] 贾秀红,佃袁勇,胡东刚,等. 基于通径分析的纯林结构特征对土壤养分的影响研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(3):1-7.

JIA X H,DIAN Y Y. Effects of stand characteristics on soil nutrients in pure plantations based on path analysis method [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(3):1-7. (in Chinese)

[10] 程武学,潘开志,杨存建. 叶面积指数 (LAI) 测定方法研究进展[J]. 四川林业科技,2010,31(3):51-54.

CHENG W X,PAN K Z,YANG C J. Research progress in the determination methods of leaf area index(LAI)[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology,2010,31(3): 51-54. (in Chinese)

[11] 刘玉琴,沙晋明,余涛,等. 基于宽波段和窄波段植被指数的草地 LAI 反演对比研究[J]. 遥感技术与应用,2014,29(4): 587-593.

LIU Y Q,SHA J M,YU T,et al. Comparing the performance of broad-band and narrow-band vegetation indices for estimation of grass LAI[J]. Remote Sensing Technology and Application,2014,29(4):587-593. (in Chinese)

- [12] 刘洋,刘荣高,陈镜明,等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报,2013,15(5):734-743.
LIU Y,LIU R G,CHEN J M,*et al.* Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data[J]. Journal of Geo-information Science,2013,15(5):734-743. (in Chinese)
- [13] 陈丽,张晓丽,焦志敏. 基于混合像元分解模型的森林叶面积指数反演[J]. 农业工程学报,2013,29(13):124-129.
CHEN L,ZHANG X L,JIAO Z M. Reversion of leaf area index in forest based on linear mixture model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(13):124-129. (in Chinese)
- [14] 孙涛. 农作物叶面积指数反演方法研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.
- [15] 张宇佳,袁金国,张莎. 2002-2011 年河北省植被 *LAI* 时空变化特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(1):86-92.
ZHANG Y J, YUAN J G, ZHANG S. Spatial-temporal change of leaf area index(*LAI*) of vegetations in Hebei Province from 2002 to 2011[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition,2015,39(1):86-92. (in Chinese)
- [16] 吴国训,阮宏华,李显风,等. 基于 MODIS 反演的 2000—2011 年江西省植被叶面积指数时空变化特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(1):11-17.
WU G X,RUAN H H,LI X F,*et al.* Spatial-temporal variations of leaf area index(*LAI*) in Jiangxi province during 2000-2011 based on MODIS data[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition,2013,37(1):11-17. (in Chinese)
- [17] 柳艺博,居为民,陈镜明,等. 2000—2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征[J]. 科学通报,2012,57(16):1435-1445.
LIU Y B,JU W M,CHEN J M,*et al.* Spatial and temporal variations of forest *LAI* in China during 2000-2010[J]. Chinese Science Bulletin,2012,57(22):2846-2856. (in Chinese)
- [18] 黄玫,季劲钧. 中国区域植被叶面积指数时空分布[J]. 生态学报,2010,30(11):3057-3064.
HUANG M,JI J J. The spatial-temporal distribution of leaf area index in China;a comparison between ecosystem modeling and remote sensing reversion[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(11):3057-3064. (in Chinese)
- [19] 罗宇翔,陈娟,郑小波,等. 西南山地 MODIS 遥感叶面积指数与气候的关系[J]. 贵州农业科学,2009,37(11):71-73.
LUO Y X,CHEN J,ZHENG X B,*et al.* The relationship between climate and leaf area index composed by MODIS remote sensing data in mountainous area of Guizhou Province [J]. Guizhou Agricultural Sciences,2009,37(11):71-73. (in Chinese)
- [20] 王涛,崔晓临,杨强. 陕西省气温降水变化特征的区域差异[J]. 云南地理环境研究,2013,25(6):27-34.
WANG T,CUI X L,YANG Q. Regional difference of temperature and precipitation characteristic in Shaanxi province[J]. Yunnan Geographic Environment Research,2013,25(6):27-34. (in Chinese)
- [21] 李登科,范建忠,王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2896-2903.
LI D K,FAN J Z,WANG J. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(11):2896-2903. (in Chinese)
- [22] 范建忠,李登科,董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测[J]. 农业工程学报,2012,28(7):228-234.
FAN J Z,LI D K,DONG J F. Remote sensing analysis of vegetation restoration in key ecological construction areas of Shaanxi province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(7):228-234. (in Chinese)
- [23] 云建英,杨甲定,赵哈林. 干旱和高温对植物光合作用的影响[J]. 西北植物学报,2006,26(3):641-648.
YUN J Y,YANG J D,ZHAO H L. Research progress in the mechanism for drought and high temperature to affect plant photosynthesis[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2006,26(3):641-648. (in Chinese)