

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.024

基于 Landsat 影像的 NDVI 对植被与影响因子交互耦合的响应

林玉英¹ 胡喜生¹ 邱荣祖¹ 张正雄¹ 林 乔¹ 林金国²

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学材料工程学院, 福州 350002)

摘要: 植被是陆地最重要的生态系统,在全球气候变化中发挥了重要的调节作用,研究植被时空动态变化具有重要的科学意义和现实价值。基于 2007 年、2012 年和 2016 年 Landsat 卫星遥感影像提取的归一化植被指数 (NDVI) 以及三明市区二类调查矢量数据,研究了闽江上游区域近 10 年的植被 NDVI 指数的时空变化特征及其影响因子。结果表明:研究区 2007 年、2012 年和 2016 年的 NDVI 指数值逐渐提高,分别为 0.72、0.75 和 0.79,植被覆盖度高,总体生态质量较好;NDVI 低值区位于沙溪两侧带状的市辖区所在地、各乡镇居民集中点以及道路网络周边;不同植被类型的 NDVI 指数由大到小依次为:阔叶树林、灌木林、马尾松林、竹林、杉木林、杂木林、桉树林、其他林地、经济林、橡树林、非林地;NDVI 指数值随着林龄、郁闭度和坡度的增加逐渐增加,随着立地等级的提高而下降。进一步对 NDVI 指数对植被与影响因子交互耦合的响应进行分析,得到结果:依据不同植被类型的 NDVI 指数随着林龄变化规律的不同,将植被划分为:稳步上升型,如阔叶树林和马尾松林;前期上升快而后期慢型,如桉树林;先升后降型,如杉木林和其他林地。马尾松林的 NDVI 指数呈现随着坡度的增加而增加的趋势;而其他森林植被类型的 NDVI 指数呈现随着坡度的增加先升后降,在坡度为 30°~40°处达到最高值;不同植被类型的 NDVI 指数对郁闭度的响应机制不同。

关键词: 植被覆盖; 归一化植被指数; 闽江上游; Landsat

中图分类号: TP751; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0212-08

Responses of Landsat-based NDVI to Interaction of Vegetation and Influencing Factors

LIN Yuying¹ HU Xisheng¹ QIU Rongzu¹ ZHANG Zhengxiong¹ LIN Qiao¹ LIN Jinguo²

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. College of Material Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Vegetation is the most important ecosystem in the earth, which plays an important regulatory role in global climate change. Research on the temporal and spatial dynamic changes of vegetation has important scientific and practical value. Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) of Landsat satellite remote sensing imagery extracted in 2007, 2012 and 2016 and the forest inventory data of Sanming City, the spatio-temporal changes of NDVI of Minjiang River upstream area in the last 10 years and the influencing factors were studied. The results showed that the NDVI values of the study area in 2007, 2012 and 2016 were increased gradually, and their values were 0.72, 0.75 and 0.79, respectively, which indicated that the coverage of vegetation was high, and the overall ecological quality was good. The lower NDVI values were located in the urban area, the concentration points of the township residents and near the road network. The NDVI values of different vegetation types were in a descending trend as broadleaf forest, shrub forest, Masson pine forest, bamboo forest, Chinese fir forest, miscellaneous wood forest, eucalyptus forest, other wooded land, economic forest, eucalyptus forest and non-forest land. NDVI index value was gradually increased with the increase of forest age, canopy closure and slope, while it was decreased with the increase of grade of the site quality. According to variation of changing dynamics of NDVI index with age of different types of vegetation, and the vegetation was divided

收稿日期: 2018-06-16 修回日期: 2018-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201100)和福建省自然科学基金项目(2015J01606)

作者简介: 林玉英(1988—),女,博士生,主要从事 3S 技术和道路景观生态研究,E-mail: linyuying2013@fafu.edu.cn

通信作者: 林金国(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事木材科学和林业工程研究,E-mail: fjlinjg@126.com

into the following three types: type of steadily rising, such as broad-leaved forest and *Pinus massoniana* forest; type of rising fast at early stage and slow at late stage, such as eucalyptus forest; type of rising first and then fall, such as Chinese fir forest and other woodland. The NDVI value of *Pinus massoniana* forest was increased with the increase of slope, while the NDVI value of other forest vegetation types was risen first and then decreased with the increase of slope, and reached the highest value at the slope of 30° ~ 40°. The NDVI index values of different vegetation types had different responses to canopy closure.

Key words: vegetation cover; normalized difference vegetation index; upper reaches of Minjiang River; Landsat

0 引言

植被是陆地最重要的生态系统,是土壤圈、水圈和大气圈的物质循环和能量流动的枢纽,在保持水土、涵养水源、调节大气等方面发挥了重要作用^[1-2],研究植被时空动态变化具有重要的科学意义和现实价值,能够为区域生态环境的可持续发展提供科学依据^[3-4]。遥感影像数据由于其可获取性、覆盖面积广、时空分辨率高,已被广泛应用于大时空尺度的植被覆盖变化的监测研究^[5-6]。其中利用植被在红波段与近红外波段的反射特征构建的归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI),已经成为监测植被覆盖情况及其生长状况的最佳遥感指数^[7-8],广泛应用于不同尺度植被覆盖时空变化及其对气候因子响应机制的研究^[2,9-10]。研究表明 NDVI 指数不仅可以反映植被覆盖的时间序列变化,还可以在像元水平进行可视化,为植被覆盖定量动态监测提供有力的工具^[11]。

然而,以往研究大多基于 GIMMS NDVI、SPOT-VGT NDVI 或 MODIS NDVI 等产品数据^[7, 12-13],时间分辨率高,而空间分辨率偏低,适用于中大尺度区域的研究,在小尺度区域研究中精度偏低。利用 Landsat 系列数据反演的精度可达到 30 m,可用于中小尺度区域的研究,但其回访周期较长,在多云多雨的中国南方地区可用数据较少^[14]。当前采用 Landsat 系列数据提取 NDVI 指数的研究主要集中在各种空间尺度上植被覆盖的变化监测及其退化原因的分析^[15-16]。植被 NDVI 值随着土地覆盖类型变化而变化,同一覆盖类型(如森林)在不同地形地貌条件下也可能存在差异^[17],然而对不同植被类型的 NDVI 指数进行对比的研究鲜见报道,对植被 NDVI 指数在不同植被类型与不同林分特征(如起源、林龄、郁闭度)和坡度等因子相互耦合情况下响应机制的研究更少见报道。

福建省是我国南方重点林区,森林覆盖率位居全国第一,研究区位于福建省闽江上游沙溪支流区域,森林覆盖率达 77%,位居全省第一,是全省重要林业产业基地与全国重点林区。本文基于 2007

年、2012 年和 2016 年具有较高空间分辨率(30 m)的 Landsat 影像数据,以像元为基本计算单元,采用像元二分模型法,分析闽江上游区域植被 NDVI 指数的时空变化特征及其对影响因子交互耦合的响应机制,以期为闽江流域植被监测和生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

闽江上游地处福建省中西部,位于武夷山脉与戴云山脉之间的汇水区,东经 116°22' ~ 118°39',北纬 25°29' ~ 27°07'。境内沙溪等 5 条河流汇于沙溪河,为闽江上游水源地。研究区为南方重点林业市县(区)、全国重点毛竹基地之一,全国南方林区综合改革试验区。全区大部分属亚热带气候,年平均气温 14 ~ 19℃,年平均降雨量 1 500 ~ 1 900 mm,年平均日照时间 1 800 h。地带性植被以属中亚热带常绿阔叶树种樟科和壳斗科为主,人工林以马尾松林、杉木林和毛竹林为主。

2 研究方法

2.1 数据来源

遥感数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的 Landsat TM 和 Landsat OLI 数据。由于卫星遥感影像受天气的影响较大,获取具有合适的时间间隔、物候相近、云量又少的影像非常困难,尤其在多云多雨的中国南方地区可用数据更少。为此,本研究尽量选取云量少且处在生长季的影像,经筛选,符合要求的只有 2007 年 5 月 7 日、2012 年 8 月 3 日和 2016 年 3 月 28 日的卫星影像,云量分别为 0、0.23%、0。另外,2007 年、2012 年和 2016 年的森林二类调查矢量数据库来源于三明市林业局,用于提取不同森林植被的空间分布情况,以及提取林分特征(如林龄、郁闭度)和坡度等影响因子。

2.2 数据预处理

数据预处理包括辐射定标、大气校正和配准。对于 2007 年和 2012 年的 Landsat TM 的辐射校正采用 CHANDER 等^[18]和 CHARVZ^[19]的模型和大气校

正参数,对于 2016 年的 Landsat OLI 的辐射校正采用美国 USGS 提供的定标公式和参数 (<http://glovis.usgs.gov>),将影像的灰度(DN)转换为传感器处反射率,以减少不同时相影像之间在地形、光照和大气等方面引起的差异;不同时相影像之间的配准采用二次多项式和最邻近象元法^[20-21],配准的均方根误差小于 0.5 个像元。

2.3 NDVI 指数的提取

NDVI 指数的标准算法为

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \tag{1}$$

式中 ρ_{NIR} ——遥感影像中近红外波段的反射率
 ρ_R ——遥感影像中红光波段的反射率

由于受大气、地表状况、年份、季节和区域等条件影响,NDVI 值随时间与空间而变化^[22]。为了排除这些影响,不少研究采用累积归一化植被指数^[5]、平均归一化植被指数和最大归一化植被指数来描述植被年际变化^[7,23]。这些指标比较适用于具有高时间分辨率而空间分辨率低的数据,然而在时间分辨率较低而空间分辨率较高的 Landsat 遥感影像数据中运用难度较大。像元二分模型法因其具有操作简单、精度较高等优点在利用 Landsat 影像进行植被监测中得以广泛应用^[15,22]。植被 NDVI 指数值随着物候的变化而变化,NDVI 指数有一定的饱和现象,但在实际研究中很难找到饱和的影像,因此,本文假设所收集的三期影像均为饱和影像,则三期相应的 NDVI 指数最大和最小值即为饱和值和全裸土壤背景值,此时借助像元二分模型法,采用研究区域各时相 NDVI 指数的最大和最小值来取代 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 计算各像元的植被 NDVI 指数值(即标准化后的值),在一定程度上可以消除物候对 NDVI 指数值的影响^[22],使得 2007 年、2012 年和 2016 年 3 个时期的 NDVI 指数具有可比性。像元二分模型为

$$NDVI' = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} + NDVI_{min}) \tag{2}$$

式中 $NDVI'$ ——经标准化后的像元 NDVI 指数
 $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ ——各时相 NDVI 指数的最大和最小值

2.4 NDVI 指数对植被与影响因子交互耦合的响应分析方法

基于森林资源二类调查矢量数据库,根据优势树种的情况,将植被类型划分为阔叶树林、马尾松林、杉木林、竹林、桉树林、橡树林、经济林、杂木林、灌木林、其他林地和非林地 11 类;根据森林起源,将植被类型分为天然林、人工林、飞播林和其他 4 类;根据龄级,将植被类型分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林 5 类;将植被郁闭度划分为 5 类:

0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8 和大于 0.8;将坡度划分为 5 类:0~10°、11°~20°、21°~30°、31°~40°和大于 40°;将立地等级划分为 5 类:肥沃、较肥沃、中等肥沃、瘠薄和其他。

在以上植被类型和影响因子分类的基础上,采用 ArcGIS 10.2 软件对植被与影响因子逐一进行融合,生成植被类型、森林起源、植被龄级、植被郁闭度、坡度和立地等级矢量数据图层,分别与 NDVI 指数空间分布图叠加,进而采用以表格显示分区统计工具即可汇总不同植被类型、不同影响因子的 NDVI 指数平均值。为了分析 NDVI 指数对植被与影响因子交互耦合的响应机制,首先,分别将植被类型矢量数据图层与植被龄级、植被郁闭度、坡度等因子进行相交叠加并融合,生成植被类型与各因子交互耦合的矢量数据图层,然后采用以表格显示分区统计工具汇总植被类型与各因子交互耦合情景下不同类别的 NDVI 指数平均值,对不同类型的 NDVI 指数进行对比分析,可以探索 NDVI 指数对植被与影响因子交互耦合的响应机制。技术路线图如图 1 所示。

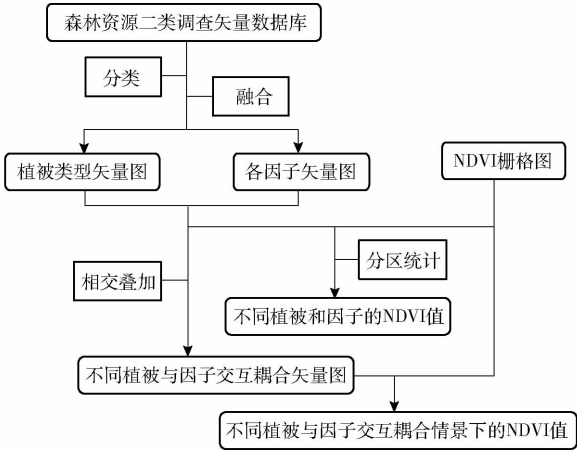


图 1 NDVI 指数对植被与影响因子交互耦合的响应分析技术路线

Fig.1 Technical route of response of NDVI to interactive coupling of vegetation and impact factors

3 结果与分析

3.1 NDVI 指数的时空变化规律

经统计,研究区的 NDVI 指数在研究期间逐渐提高,2007 年、2012 年和 2016 年的 NDVI 指数值分别为 0.72、0.75 和 0.79。从空间上看,3 个时期 NDVI 的空间分布格局较一致(图 2),其中 NDVI 低值区位于沙溪两侧带状的市辖区所在地、各乡镇居民集中点以及道路网络附近;而 NDVI 高值区主要位于山区,该区域人口分布较少、森林覆盖度较高。

为了进一步分析 NDVI 指数的时间变化动态,进一步将各年份的 NDVI 指数按自然断点间隔分成

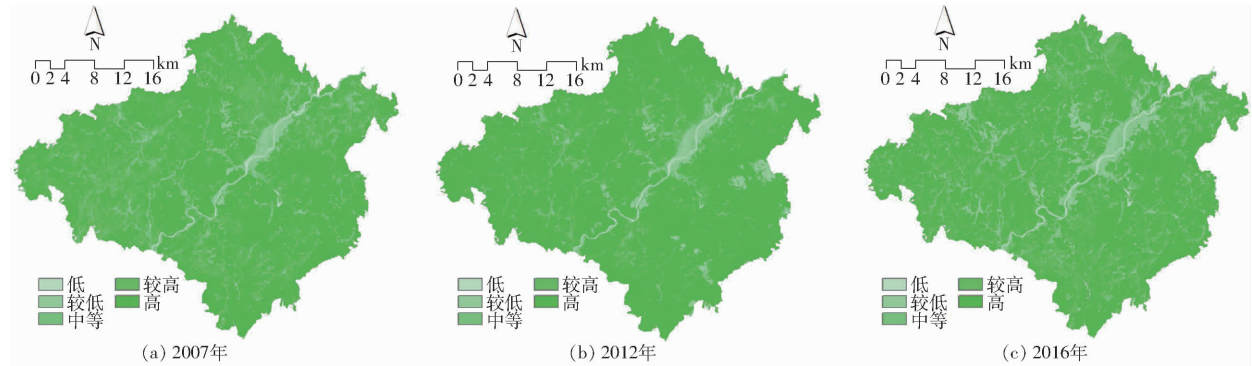


图 2 2007 年、2012 年和 2016 年 NDVI 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution maps of NDVI in 2007, 2012 and 2016

5 级,分别代表低、较低、中等、较高、高 5 个等级的植被覆盖度(表 1)。总体来说,不同年份的 NDVI 等级为较高、高所占的比例均大于 81%,说明研究区生态质量较好。这是因为该研究区为森林高覆盖区(近 80%覆盖率)^[24]。从时间来看,从 2007 年到 2016 年,NDVI 等级为低、较低所占的面积前期(2007—2012)变化不大,而后期(2012—2016)上升较快,由 2007 年的 4.6% 到 2012 年的 4.7%,2016 年则上升到 7.6%;NDVI 等级为中等所占面积先降后升,先由 2007 年的 9.3% 下降到 2012 年的 6.1%,随即上升到 2016 年的 11.3%;而 NDVI 等级为较高、高所占的面积则先升后降,先由 2007 年的 86.1% 上升到 2012 年的 89.2%,随即下降到 2016

年的 81.1%。这说明虽然 2007 年、2012 年和 2016 年的 NDVI 指数逐渐上升,然而研究区的生态质量呈现前期提高而后期下降的趋势。

由 2007—2012 年、2012—2016 年和 2007—2016 年这 3 个时期 NDVI 指数随时间的变化结果来看(图 3、表 2),2007—2012 年期间,NDVI 指数降低的面积达 73.26 km²,约占研究区面积的 6.4%,而 NDVI 指数提高的面积为 207.20 km²,比例为 18.1%;2012—2016 期间,NDVI 指数降低的面积达 139.66 km²,约占研究区总面积的 12.2%,而 NDVI 指数提高的面积只有 112.19 km²,比例仅为 9.8%。两个期间 NDVI 指数变化的分析结果与 2007 年、2012 年和 2016 年各级 NDVI 面积的变化趋势结果一致,两者都表明研究区的生态质量呈现前期提高而后期下降的趋势。就整个研究年间(2007—2016 年)而言,研究区的生态质量改善的面积大于恶化的面积,这与 NDVI 指数平均值在研究年间逐年提高的结果相符。具体表现为 NDVI 指数降低的面积达 100.37 km²,约占研究区面积的 8.8%;而 NDVI 指数提高的面积为 186.00 km²,约占研究区面积的 16.2%。

从空间上看,NDVI 指数降低的地点主要分布在城区和各乡镇周边(图 3 中的红色图斑),其中有一个很明显的特征是红色图斑连串呈带状特征,这

表 1 2007 年、2012 年和 2016 年各等级 NDVI 的面积及占比

Tab.1 Area of different grades of NDVI in 2007, 2012 and 2016

NDVI 等级	2007 年		2012 年		2016 年	
	面积/ km ²	百分 比/%	面积/ km ²	百分 比/%	面积/ km ²	百分 比/%
低	2.29	0.2	6.87	0.6	3.43	0.3
较低	50.37	4.4	46.93	4.1	83.57	7.3
中等	106.46	9.3	69.83	6.1	129.36	11.3
较高	373.19	32.6	185.45	16.2	269.02	23.5
高	612.44	53.5	835.67	73.0	659.38	57.6
合计	1 144.75	100	1 144.75	100	1 144.75	100

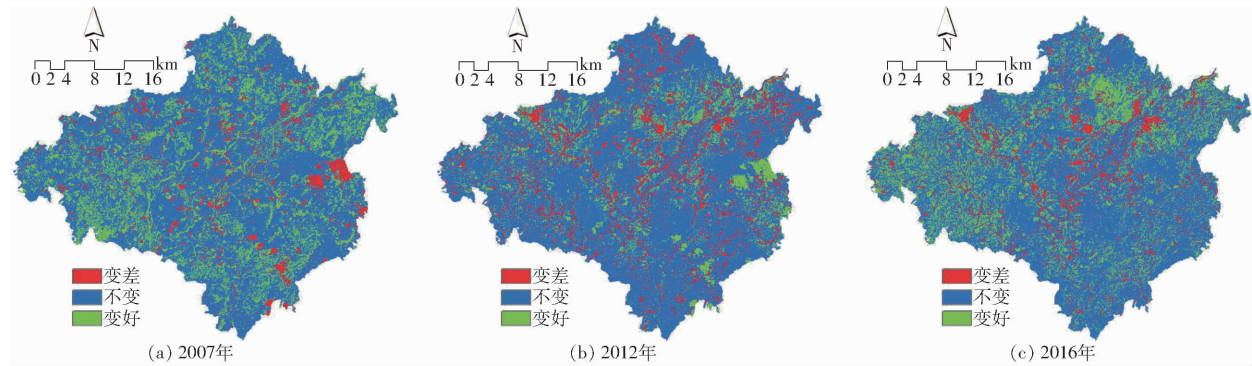


图 3 2007 年、2012 年和 2016 年 NDVI 变化的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution maps of changes of NDVI in 2007, 2012 and 2016

些红色图斑主要分布在公路两侧。说明道路建设对植被造成一定的负面影响。而 NDVI 指数提高的地点遍布整个研究区(图 3 中绿色图斑),位于研究区北部具有一片面积较大的区域(金丝湾省级森林公园)在 2007—2016 年间植被得到了显著改善。由此可见,植被恢复的原因在于:一方面得益于政府实施的森林保护政策,使得森林覆盖逐渐得到一定程度的恢复;另一方面城市中心部分的老城区经过不断绿化,其 NDVI 指数也得到改善。

表 2 2007 年、2012 年和 2016 年 NDVI 变化的面积统计

Tab.2 Changing area of NDVI in 2007, 2012 and 2016

变化等级	2007—2012 年		2012—2016 年		2007—2016 年	
	面积/ km ²	百分 比/%	面积/ km ²	百分 比/%	面积/ km ²	百分 比/%
变差	73.26	6.4	139.66	12.2	100.37	8.8
不变	864.29	75.5	892.91	78.0	858.38	75.0
变好	207.20	18.1	112.19	9.8	186.00	16.2
合计	1 144.75	100	1 144.75	100	1 144.75	100

3.2 不同植被类型 NDVI 指数的时空变化规律

不同植被类型具有不同的生物学特性,其 NDVI 指数有所差别^[13,25],为此,本研究分别统计 2007 年、2012 年和 2016 年不同植被类型的 NDVI 指数平

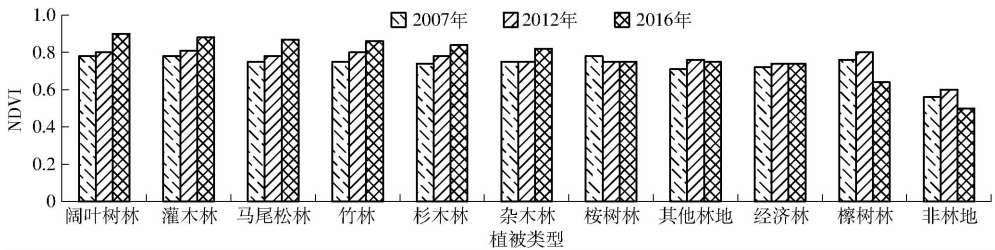


图 4 不同植被类型 2007 年、2012 年和 2016 年 NDVI 变化

Fig.4 Variation of NDVI of different types of vegetation in 2007, 2012 and 2016

表 3 不同植被类型 2007 年、2012 年和 2016 年 NDVI 变化情况

Tab.3 Changes in NDVI of different types of vegetation in 2007, 2012 and 2016

植被类型	NDVI			NDVI 变化率/%		
	2007 年	2012 年	2016 年	2007—2012 年	2012—2016 年	2007—2016 年

植被类型	NDVI			NDVI 变化率/%		
	2007 年	2012 年	2016 年	2007—2012 年	2012—2016 年	2007—2016 年
阔叶树林	0.78	0.80	0.90	2.6	12.5	15.4
灌木林	0.78	0.81	0.88	3.8	8.6	12.8
马尾松林	0.75	0.78	0.87	4.0	11.5	16.0
竹林	0.75	0.80	0.86	6.7	7.5	14.7
杉木林	0.74	0.78	0.84	5.4	7.7	13.5
杂木林	0.75	0.75	0.82	0	9.3	9.3
桉树林	0.78	0.75	0.75	-3.8	0	-3.8
其他林地	0.71	0.76	0.75	7.0	-1.3	5.6
经济林	0.72	0.74	0.74	2.8	0	2.8
橡树林	0.76	0.80	0.64	5.3	-20.0	-15.8
非林地	0.56	0.60	0.50	7.1	-16.7	-10.7

均值(图 4)。不同植被类型的 NDVI 指数由大到小依次为:阔叶树林、灌木林、马尾松林、竹林、杉木林、杂木林、桉树林、其他林地、经济林、橡树林、非林地。NDVI 是植被覆盖、植被光合作用强度、生物量、绿度等参数的综合反映^[9,26],阔叶树林和灌木林由于具有较高的盖度、绿度等,因此 NDVI 指数较高;而经济林、橡树林则为单层林且郁闭度较小,因此 NDVI 指数也较低。不同植被类型的 NDVI 指数年变化规律表明(表 3),阔叶树林、灌木林、马尾松林、竹林、杉木林等增长较快,在 2007—2016 年年间这些植被类型的 NDVI 指数均至少提高了 12.8%;而橡树林、桉树林和非林地的 NDVI 指数值在研究后期均下降,其中橡树林下降最快,比例高达 15.8%。这主要是由于研究区早期将橡树作为一种人工栽培树种,森林经营管理较好,然而其经济效益不如杉木、马尾松等南方主要用材树种,导致了一方面橡树林面积逐渐萎缩,另一方面其生长质量也逐渐下降,因此研究后期橡树林的 NDVI 指数急速下降。21 世纪初桉树林在闽西北地区大力推广,种植面积不断扩大,然而由于其抗寒能力问题以及市场价格走低,2012 年左右以后桉树林逐渐被取代,这可能是导致其 NDVI 指数前期下降而后期稳定的原因。

3.3 NDVI 指数的影响因素

为进一步探讨林分因子和地形地貌因子对 NDVI 指数的影响,本研究对 NDVI 指数对不同森林起源、不同龄级、不同郁闭度、不同坡度、不同立地等级的响应机制进行了对比分析(表 4)。结果表明,人工林的 NDVI 指数明显大于天然林的,前者 NDVI 指数为 0.93,而后者为 0.88;NDVI 指数随着林龄的增加逐渐增加,呈现出从幼龄林的 0.80 快速提高到中龄林的 0.86,而后增速不明显的规律;NDVI 指数随着郁闭度的增加也呈现逐渐增加的规律,这与随着林龄变化的规律类似,NDVI 指数首先由郁闭度(0~0.2)的 0.71 迅速提升到郁闭度(0.2~0.4)的 0.82,再到郁闭度(0.4~0.6)的 0.86,而后随着郁闭度的增加,NDVI 指数基本保持稳定;NDVI 指数随着坡度的增加而增加,在坡度平缓的地方,由于受人为干扰较大,其 NDVI 指数较低,而在坡度较大的

表 4 NDVI 的影响因子
Tab.4 Influence factors of NDVI

影响因子		NDVI 平均值
森林起源	天然林	0.88
	人工林	0.93
	飞播林	0.89
	其他	0.51
龄级	幼龄林	0.80
	中龄林	0.86
	近熟林	0.87
	成熟林	0.87
	过熟林	0.89
郁闭度	0 ~ 0.2	0.71
	0.2 ~ 0.4	0.82
	0.4 ~ 0.6	0.86
	0.6 ~ 0.8	0.87
	> 0.8	0.86
坡度/(°)	0 ~ 10	0.49
	11 ~ 20	0.80
	21 ~ 30	0.85
	31 ~ 40	0.89
	> 40	0.89
立地等级	肥沃	0.82
	较肥沃	0.84
	中等肥沃	0.88
	瘠薄	0.89
	其他	0.48

地方,NDVI 指数较高,该研究结果与豫西山地植被 NDVI 随着坡度增加而增大的规律一致^[17];然而,随着立地等级的提高,NDVI 指数呈现相反的趋势,原因有待结合森林景观空间分布进一步深入探索。

3.4 NDVI 指数对植被与影响因子交互耦合的响应

植被类型一方面影响 NDVI 指数,另一方面也影响 NDVI 指数对林龄、郁闭度和坡度的响应机

制^[8, 10]。由图 5 可知,阔叶树林的 NDVI 指数随着年龄增加单调递增;马尾松林除了幼龄林 NDVI 指数异常外,也呈现随着林龄增加单调递增的趋势;杉木林和其他林地的 NDVI 指数到近熟林达到峰值,而后逐渐下降;桉树林的 NDVI 指数由幼龄林到中龄林迅速提升,而后提高比较缓慢,成熟林的 NDVI 指数达到最大,而后降低;而杂木林的 NDVI 指数值随着林龄的增长显现交错递增的趋势。从总体上看,不同植被类型大都表现为 NDVI 指数随着林龄增大而增大的趋势,然而不同植被类型的 NDVI 指数随着林龄增大的变化过程不尽相同,依次可以将植被划分为以下3 种类型:稳步上升型,如阔叶树林和马尾松林;前期上升快而后期慢型,如桉树林;先升后降型,如杉木林和其他林地。

由图 6 可知,阔叶树林、马尾松林、杉木林和其他林地的 NDVI 指数呈现随着郁闭度的增加逐渐上升的趋势;而灌木林和桉树林的 NDVI 指数呈现随着郁闭度的增加逐渐下降的趋势;杂木林则比较没有规律。由此可见,并非林分郁闭度越高,NDVI 指数越高,不同植被类型的 NDVI 指数对郁闭度的响应机制不同。

由图 7 可知,马尾松林的 NDVI 指数呈现随着坡度的增加而增加的趋势;而其他森林植被类型的 NDVI 指数呈现先随着坡度的增加而增加的趋势,在坡度为 30°~40°处达到最高值,而 NDVI 指数在坡度大于 40°的地方均呈现不同程度的下降。由此可以推测,马尾松林在坡度越陡的地方生长状况越好;而其他森林植被类型在坡度超过 40°的地方生长质量开始下降。

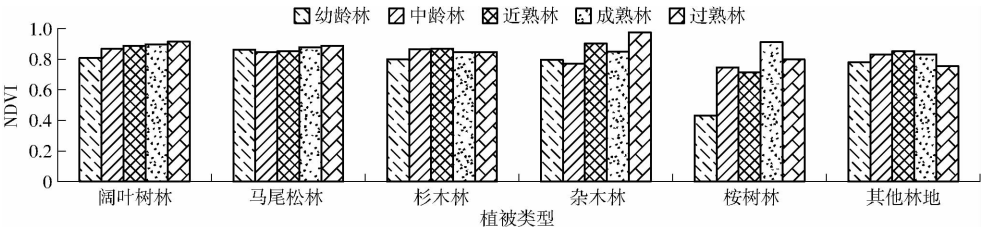


图 5 不同植被类型 NDVI 随林龄的变化规律

Fig. 5 Changes of NDVI with forest age for different types of vegetation

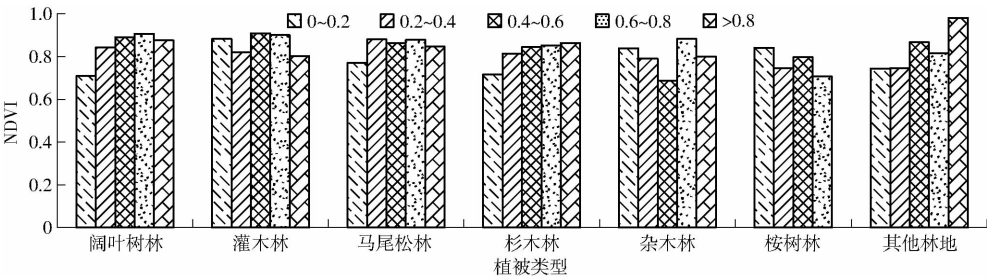


图 6 不同植被类型 NDVI 随郁闭度的变化规律

Fig. 6 Changes of NDVI with forest canopy density for different types of vegetation

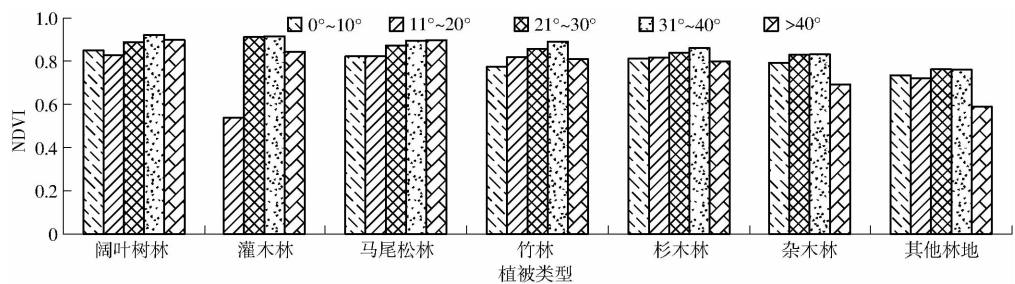


图7 不同植被类型 NDVI 随坡度的变化规律

Fig. 7 Changes of NDVI with slope for different types of vegetation

4 结论

(1)研究区的 NDVI 指数在研究期间逐渐提高, 2007 年、2012 年和 2016 年的 NDVI 指数分别为 0.72、0.75 和 0.79。NDVI 较低区位于沙溪两侧带状的市辖区所在地、各乡镇居民集中点以及道路网络附近。

(2)从空间上看,不同年份的 NDVI 等级为较高、高所占的比例均大于 81%, 总体生态质量较好。从时间来看,研究区的生态质量呈现前期提高而后下降的趋势。NDVI 指数降低的地点主要分布在城区、各乡镇周边及公路两侧。不同植被类型的 NDVI 指数由大到小依次为:阔叶树林、灌木林、马尾松林、竹林、杉木林、杂木林、桉树林、其他林地、经济林、橡树林、非林地。

(3)NDVI 指数随着林龄的增加逐渐增加,呈现出从幼龄林 0.80 快速提高到中龄林的 0.86,而后增速不明显的规律;NDVI 指数随着郁闭度的增加也呈现逐渐增加的规律,与随着林龄变化的规律类

似,NDVI 指数首先由郁闭度(0~0.2)的 0.71 迅速提升到郁闭度(0.2~0.4)的 0.82,再到郁闭度(0.4~0.6)的 0.86,而后随着郁闭度的增加,NDVI 指数基本保持稳定;NDVI 指数随着坡度的增加而增加;而随着立地等级的提高,NDVI 指数呈现相反的趋势,其中的原因有待结合森林景观空间分布进一步深入探索。从总体上看,不同植被类型大都表现为 NDVI 指数随着林龄增大而增大的趋势,然而不同植被类型的 NDVI 指数值随着林龄增大的变化过程不尽相同,依次可以将植被划分为以下 3 种类型:稳步上升型,如阔叶树林和马尾松林;前期上升快而后期慢型,如桉树林;先升后降型,如杉木林和其他林地。不同植被类型 NDVI 指数值对郁闭度的响应机制不同。马尾松林的 NDVI 指数呈现随着坡度的增加而增加的趋势;而其他森林植被类型的 NDVI 指数呈现先随着坡度的增加而增加的趋势,在坡度为 30°~40°处达到最高值,而 NDVI 指数在坡度大于 40°的地方均呈现不同程度的下降。

参 考 文 献

1 PIAO S, WANG X, CIAIS P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228–3239.

2 杜加强,贾尔恒·阿哈提,赵晨曦,等. 1982—2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3567–3578.

DU Jiaqiang, JIA ER HENG·A Hati, ZHAO Chenxi, et al. Dynamic changes in vegetation NDVI from 1982 to 2012 and its responses to climate change and human activities in Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3567–3578. (in Chinese)

3 沈关东,朱志梅,刘欢,等. 基于 NDVI 的渭南市植被覆盖时空变化研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(增刊 2): 351–353.

SHEN Guandong, ZHU Zhimei, LIU Huan, et al. Research on spatial-temporal variations of vegetation cover in Weinan City based on NDVI [J]. *China Population Resources and Environment*, 2016, 26(Supp. 2): 351–353. (in Chinese)

4 刘世梁,田钰钰,尹艺洁,等. 云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对于干旱的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4699–4707.

LIU Shiliang, TIAN Yunyu, YIN Yijie, et al. Temporal dynamics of vegetation NDVI and its response to drought conditions in Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4699–4707. (in Chinese)

5 孙庆龄,李宝林,许丽丽,等. 2000—2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(12): 1707–1716.

SUN Qingling, LI Baolin, XU Lili, et al. Analysis of NDVI change trend and its impact factors in the Three-River Headwater Region from 2000 to 2013 [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(12): 1707–1716. (in Chinese)

6 张圣微,张睿,刘廷玺,等. 锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与影响因素分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 253–260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170332&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.032.

ZHANG Shengwei, ZHANG Rui, LIU Tingxi, et al. Dynamics of fractional vegetation cover and its influence factors in Xilingol steppe [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 253–260. (in Chinese)

- 7 刘可, 杜灵通, 侯静, 等. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1885–1896.
LIU Ke, DU Lingtong, HOU Jing, et al. Spatiotemporal variations of NDVI in terrestrial ecosystems in China from 1982–2012 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1885–1896. (in Chinese)
- 8 胡玉福, 蒋双龙, 刘宇, 等. 基于 RS 的安宁河上游植被覆盖时空变化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 205–215. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140532&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.032.
- 9 HU Yufu, JIANG Shuanglong, LIU Yu, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage on upper Anning river based on RS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 205–215. (in Chinese)
- 10 罗文玮, 赖日文, 陈思雨, 等. 基于 NDVI 的福建省植被变化特征分析 [J]. 森林与环境学报, 2016, 36(2): 141–147.
LUO Wenwei, LAI Riwen, CHEN Siyu, et al. Analysis of vegetation variation characteristics in Fujian based on NDVI [J]. Journal of Forest and Environment, 2016, 36(2): 141–147. (in Chinese)
- 11 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1425–1435.
ZHANG Jinghua, FENG Zhiming, JIANG Luguang, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9): 1425–1435. (in Chinese)
- 12 汪小钦, 刘亚迪, 周伟东, 等. 基于 TAVI 的长汀县植被覆盖度时空变化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 289–296. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160139&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.039.
- 13 WANG Xiaoqin, LIU Yadi, ZHOU Weidong, et al. Research on temporal and spatial variation of fractional vegetation cover in Changting County based on TAVI [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 289–296. (in Chinese)
- 14 贺振, 贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 179–185. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170224&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.024.
- 15 HE Zhen, HE Junping. Remote sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River Basin during 1982–2013 [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 179–185. (in Chinese)
- 16 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 等. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 1–10.
CHENG Fangyan, LIU Shiliang, YIN Yijie, et al. The dynamics and main driving factors of coastal vegetation in Guangxi based on MODIS NDVI [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 1–10. (in Chinese)
- 17 李恒凯, 雷军, 吴娇. 基于多源时序 NDVI 的稀土矿区土地毁损与恢复过程分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 232–240.
LI Hengkai, LEI Jun, WU Jiao. Analysis of land damage and recovery process in rare earth mining area based on multi-source sequential NDVI [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 232–240. (in Chinese)
- 18 贾宝全. 基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1654–1666.
JIA Baoquan. Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1654–1666. (in Chinese)
- 19 徐芝英, 胡云锋, 甄霖, 等. 基于小波的浙江省 NDVI 与自然—人文因子多尺度空间关联分析[J]. 地理研究, 2015, 34(3): 567–577.
XU Zhiying, HU Yunfeng, ZHEN Lin, et al. Wavelet-based multi-scale analysis of NDVI and background factors in Zhejiang province [J]. Geographical Research, 2015, 34(3): 567–577. (in Chinese)
- 20 张静静, 郑辉, 朱连奇, 等. 豫西山植被 NDVI 及其气候响应的多维变化[J]. 地理研究, 2017, 36(4): 765–778.
ZHANG Jingjing, ZHENG Hui, ZHU Lianqi, et al. Multi-dimensional changes of vegetation NDVI and its response to climate in Western Henan Mountains [J]. Geographical Research, 2017, 36(4): 765–778. (in Chinese)
- 21 CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893–903.
- 22 CHARVZ J P S. Image-based atmospheric corrections—Revisited and revised [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(9): 1025–1036.
- 23 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用 [J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853–7862.
XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853–7862. (in Chinese)
- 24 HU X, WU Z, WU C, et al. Effects of road network on diversiform forest cover changes in the highest coverage region in China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 28–39.
- 25 彭文甫, 王广杰, 周介铭, 等. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1975–1988.
PENG Wenfu, WANG Guangjie, ZHOU Jieming, et al. Dynamic monitoring of fractional vegetation cover along Minjiang River from Wenchuan County to Dujiangyan City using multi-temporal Landsat 5 and 8 images [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1975–1988. (in Chinese)
- 26 LI A, WU J, HUANG J. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in Inner Mongolia [J]. Landscape Ecology, 2012, 27(7): 969–982.
- 27 HU X, WU C, HONG W, et al. Forest cover change and its drivers in the upstream area of the Minjiang River, China [J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 121–128.
- 28 王静, 王克林, 张明阳, 等. 南方丘陵山地带 NDVI 时空变化及其驱动因子分析 [J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1712–1723.
WANG Jing, WANG Kelin, ZHANG Mingyang, et al. Temporal-spatial variation in NDVI and drivers in hilly terrain of southern China [J]. Resources Science, 2014, 36(8): 1712–1723. (in Chinese)
- 29 李恒凯, 雷军, 杨柳, 等. 基于 Landsat 影像的离子稀土矿区植被覆盖度提取及景观格局分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 267–276.
LI Hengkai, LEI Jun, YANG Liu, et al. Extraction of vegetation coverage and analysis of landscape pattern in rare earth mining area based on Landsat image [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 267–276. (in Chinese)