

2000—2010年福建省植被覆盖度的时空演变特征

王文辉^{1,2}, 马祥庆^{1,2}, 邹显花^{1,2}, 田超^{1,2}, 靳全锋^{1,2}, 郭福涛^{1,2}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心, 福州 350002)

摘要:运用趋势分析法及 Mann-Kendall 趋势检验法对福建省 2000—2010 年植被覆盖度进行了分析,探究福建省植被覆盖度的时空演变过程。结果表明:(1) 福建省植被覆盖度以每年 0.003 15 的速率增加,但在 2005 年存在一个明显的波动下降,植被在 7 月,8 月,9 月份盖度最大。(2) 根据我国植被覆盖度分类标准,福建省以高植被覆盖度为主,2000—2010 年低、中植被覆盖度向高植被覆盖度转化 15.84%。(3) 各市区植被覆盖度变化显著,其中莆田市、宁德市、漳州市变化最为明显。通过各区域的趋势百分比可知,福建省各市区植被覆盖度以增加为主,各市区植被覆盖度增加百分比为:宁德市>漳州市>福州市>泉州市=莆田市=厦门市>龙岩市>南平市>三明市。(4) 不同植被类型区植被盖度在年际变化尺度呈现稳步增加的趋势,各植被类型盖度均值介于 0.596~0.799,此外植被覆盖度的增加量顺序依次为:湿地>草地>农作物>非植被>阔叶林=针叶林。

关键词:趋势分析; Mann-Kendall 趋势检验法; 植被覆盖度; 时空变化; 福建省

中图分类号:Q948.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)04-0234-06

Spatiotemporal Variations of Vegetation Change in Fujian Province from 2000 to 2010

WANG Wenhui^{1,2}, MA Xiangqing^{1,2}, ZOU Xianhua^{1,2},

TIAN Chao^{1,2}, JIN Quanfeng^{1,2}, GUO Futao^{1,2}

(1. *Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China*; 2. *Collaborative Innovation Center of Soil and Water Conservation, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: The trend analysis method and Mann-Kendall trend test were applied to analyze the dynamic change of vegetation coverage in Fujian Province from 2000 to 2010 in order to explore the spatiotemporal variations of vegetation cover in Fujian Province. The results showed that: (1) vegetation coverage of Fujian increased by the rate of 0.003 15 per year, but there was an obvious fluctuation in 2005; the maximum increase in the vegetation coverage was in July, August and September; (2) according to vegetation cover type classification, Fujian was mainly covered by high vegetation coverage, in total, about 15.84% of low, medium vegetation cover was converted to high vegetation cover during 2000 to 2010; (3) a significant increase in vegetation coverage in the urban areas like Putian, Ningde, Zhangzhou had changed drastically with the loss of vegetation coverage; regional trends showed that the percentage of each urban vegetation coverage in Fujian, was mainly decrease in the order: Ningde>Zhangzhou>Fuzhou>Quanzhou=Putian=Xiamen>Longyan>Nanping>Sanming; (4) different types of vegetation coverage in inter-annual variability scale had shown a steady upward trend, various types of vegetation cover average were between 0.596 and 0.799; in addition, the vegetation coverage decreased in the order: wetlands>grassland>crop>non-vegetation>broadleaf forest=needle leaved forest.

Keywords: trend analysis method; Mann-Kendall trend test; vegetation coverage; spatial-temporal change; Fujian Province

植被覆盖度是指单位面积地上部分在地面的垂直投影面积所占的百分比^[1-2],其不仅是生态气候模型、水土流失模型的重要因子^[3-4],也是评价区域生态环境变化的重要指标^[5-7],鉴于此,国内外很多学者对植被覆盖度尤其是长时间尺度的植被盖度动态变化展开研究并取得积极进展^[8-11]。目前国内关于植被盖度的时空动态变化研究也已开展,研究重点集中在水土流失,生态脆弱或人为干扰较大的区域,如新疆^[12],青海^[13],黄土高原^[14-15],陕甘宁^[16-17]。福建省位于我国东南部,尽管历史上森林覆盖率一直位于全国前列,但由于区域内多山地丘陵,土层薄,土壤抗蚀能力差,自然生态环境具有先天脆弱性,再加上人多地少,人地矛盾突出,极易造成水土流失现象。历史上福建省水土流失区域分布较广,流失面积较大,且在2000—2010年福建省不断加大水土流失治理力度,全省植被覆盖率及森林生态环境得到明显改善。目前已有学者对福建省植被覆盖度变化进行了研究^[18-21],并取得一定进展。但目前研究存在时间跨度短^[18-19],研究区域小等不足^[20-21]等不足,难以达到对福建全省长时间尺度植被恢复情况进行评价的效果。

因此,本研究以2000—2010年为时间跨度,MODIS NDVI长时间序列数据源为基础,运用逐像元趋势和Mann-Kendall趋势检验法,对全福建省2000—2010年植被覆盖度的时空分布变化进行研究,为福建省水土保持治理工作的评价及深入开展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省位于我国东南部,经纬度范围23°33′—28°19′N,115°50′—120°43′E,区域内以山地丘陵为主,形起伏较大,植被类型以阔叶林、针叶林为主(图1),土壤以红壤、砖红壤为主,抗侵蚀能力差,为亚热带气候,年降水量在1400~2000 mm。鉴于此福建省容易发生水土流失,根据2000年福建省土壤侵蚀遥感调查结果显示,福建省土壤侵蚀总面积为13127.31 km²,占全省面积的10.72%^[22],截止到2007年,福建省水土流失问题得到改善,水土流失面积减少为12253.78 km²^[23]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源与预处理 本研究所用的数据包括:(1) MODIS NDVI(Normalized differential vegetation index)影像来自地理空间数据云数据共享平台,空间分辨率为1 km,是MYD13A3月数据的L3数据,共130幅影像,其中2000年缺少1月,2月的NDVI影像,但对整体植被覆盖度的变化不产生影

响。(2) 植被类型数据来自中国科学院寒旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),空间分辨率为1 km,数据采集于2000年,将此数据根据福建省植被分布实际情况,分为六大类,分别是针叶林、阔叶林、草地、农作物、湿地、非植被。以上两类数据都经过裁剪、辐射校正、几何校正,数据可靠。利用ArcGIS 10.2空间分析与栅格计算模块对福建省2000—2010年植被覆盖度时空变化进行分析。

1.2.2 像元二分模型 本研究的植被覆盖度通过像元二分模型基于归一化植被指数计算求得。已有研究表明像元二分模型是利用植被指数NDVI求取植被覆盖度一种最简单、可靠的统计模型^[24-26],具体公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中:FVC为研究区域植被覆盖度;NDVI指研究区域归一化植被指数;NDVI_{veg}为研究区域中完全为植被的归一化植被指数;NDVI_{soil}为纯土壤像元归一化植被指数。NDVI_{veg},NDVI_{soil}通过NDVI频率累积表的5%的置信区间判纯土壤像元,95%的置信区间为纯植被像元^[27-28]。其纯植被与纯土壤的判断过程在ENVI 4.5中进行。

1.2.3 MVC法 MVC法又称为最大值合成法,通过对月最大的植被覆盖度提取,削弱云覆盖、大气等噪声因子对福建省植被覆盖的影响^[18],公式如下:

$$FVC_{\text{年}} = \max[FVC(t)] \quad (2)$$

式中:FVC_年为年最大植被覆盖;FVC(t)为各月最大植被覆盖度;t为年月数取值为1,2,3,⋯,12。

1.2.4 逐像元趋势分析法 本研究运用线性趋势法分析福建2000—2010年植被覆盖度的整体变化趋势。趋势线分析方法不但能够计算每个像元的趋势,而且可以反映每个像元的空间变化特点^[29]。具体公式为^[30]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n FVC_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \times \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (3)$$

式中:θ_{slope}代表植被覆盖度在2000—2010年变化趋势值。当θ_{slope}>0时表明研究区域在2000—2010年植被覆盖增加;当θ_{slope}<0时植被覆盖呈下降趋势;当θ_{slope}=0时表明植被覆盖基本没有发生变化。n在本研究中为11a;t为时间;FVC为植被覆盖度值。

1.2.5 Mann-Kendall趋势检验法 本研究运用Mann-Kendall趋势检验法对福建省各市区2000—2010年植被覆盖度的变化趋势进行分析。Mann-Kendall法是一种非参数统计检验方法,该方法不需

要遵循特定分布,不受少量异常值的干扰,更适用于时间序列变化的数据趋势检验,公式为^[31]:

对于植被覆盖度时间序列 x_i ,在 i 时刻($i=1,2,\dots,n-1$)即 1 为 2000 年、2 为 2001 年等,有 r_i ,

$$r = \begin{cases} 1, & x_j > x_i, \\ 0, & x_j \leq x_i \end{cases} \quad j = i+1, \dots, n \quad (4)$$

可见, r_i 是 i 时刻以后的数值 x_j 大于该时刻值 x_i 的累计个数。通过 Z 值判定植被覆盖时间变化的显著性水平,公式如下^[32],

$$Z = \frac{4}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} r_i - 1 \quad (5)$$

n 为时间序列长度即 $n=11$,当 $|Z| > Z_{0.01}$ 时趋势显著;反之不显著,即植被覆盖度随在 2000—2010 年变化剧烈;反之没有太大变化。其中 $Z_{0.01}$ 的大小与 n 有关,具体公式如下^[32]:

$$Z_{0.01} = 2.576 \left[\frac{4n+10}{9n(n-1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度时间变化分析

图 1 显示福建省植被覆盖度的时间变化情况,包括月、季节、年以及年际之间的变化,其中月植被覆盖度为多年月均值;季节植被覆盖为多年季均值;年际变化植被覆盖为相邻 2 a 最大化植被覆盖度的变化率,公式为:(当年植被覆盖—前一年最大化植被覆盖)/前一年植被 $\times 100\%$ 。结果表明,福建省植被覆盖度的月动态变化明显。由于植被生长的物候条件,植被在 7 月、8 月、9 月份盖度达到最大。图 1B 表明福建省植被覆盖度春、夏季远大于冬、秋季,且春季波动不明显,冬、秋季波动明显。由图 1C 可知福建省植被覆盖变化可分为 2000—2005 年明显波动阶段,2005—2010 年持续增长两个阶段。为进一步探究 2000 年以来福建省植被变化情况,本研究对相邻 2 a 的最大化植被覆盖度差值进行分析^[32-33],结果显示福建全省 2000—2010 年植被覆盖度整体以增加为主(图 1D),但 2000—2001 年,2003—2004 年,2004—2005 年植被覆盖度发生退化,说明福建植被覆盖变化经历了一个复杂的过程,受到区域经济发展、小气候条件及植物生境等多方面因素影响。福建省很多地区采矿业发达,在 2005 年之前与水土流失治理及植被恢复存在一个角力的过程,2005 年后各级政府加强对矿藏开采的管理,水土流失问题得到更好的治理。

2.2 植被覆盖度空间变化分析

为了更深入探讨植被覆盖度的空间变化,本研究根据《土壤侵蚀分类分级标准》将植被覆盖度分为 5 个等级:植被覆盖度 $< 30\%$,为低植被覆盖度;植被覆盖度 $30\% \sim 45\%$,为中低植被覆盖度;植被覆盖度 $45\% \sim 60\%$,为中植被覆盖度;植被覆盖度 $60\% \sim 75\%$,为中高植被覆盖度;植被覆盖度 $> 75\%$,为高植被覆盖度(表 1)。对比 2000 年和 2010 年福建省植被覆盖度图像(图 2)可以看出福建省 2000—2010 年植被覆盖度发生明显变化,各区域植被覆盖得到显著改善,福建西部及东部沿海地区明显,造成这种变化的主要原因可能是自 2000 年以来福建省省政府加大对水土流失及植被退化的监察力度,每年投入 2 000 万专项资金用于水土流失、植被退化的治理,且沿海地区由于城市化进程的加剧,城镇绿化水平快速发展以满足人民的生活质量。表 1 显示,福建省 2000 年、2010 年植被覆盖度中,高植被覆盖度占很大比例,在 2000—2010 年植被覆盖度的转化过程中,以中低植被覆盖度与高植被覆盖度增加为主,其他等级植被覆盖度以降低为主,且高植被覆盖度增加最多,中高植被覆盖度降低最多,由此可知低植被覆盖度、中植被覆盖度、中高植被覆盖度向中低植被覆盖度、高植被覆盖度转化。

2.3 各地市植被覆盖度的变化

图 3 显示福建省不同区域植被覆盖度随时间的变化趋势基本一致。为进一步探究福建省不同区域植被覆盖度不同时段的变化情况,本研究运用差值法对 2000—2005,2005—2010,2000—2010 年,3 个时段的植被覆盖度进行分析(表 2),结果表明:2000—2010 年福建省各市区植被覆盖整体呈增加趋势,但 2003—2005 年各市区植被覆盖均存在一个降低波动,2005 年以后植被覆盖度均以增加为主,各地区的植被盖度变化趋势与福建省整体变化趋势保持一致。slope 趋势分析法结果显示,福建省整体的 θ_{slope} 为 0.003 15,表明 2000—2010 年福建省整体植被覆盖度以增加为主,各市区植被盖度变化趋势类型百分比以“增加”为主,但不同区域“增加”百分比含量不同,百分比含量大小为:宁德市 $>$ 漳州市 $>$ 福州市 $>$ 泉州市 $=$ 莆田市 $=$ 厦门市 $>$ 龙岩市 $>$ 南平市 $>$ 三明市。为进一步探究福建省各区域植被覆盖变化情况,本研究运用 Mann-Kendall 趋势分析法对福建省各市区植被覆盖变化程度进行分析,研究可知,福建省各区域植被盖度均发生剧烈变化,其中宁德市、莆田市、漳州市植被盖度变化极剧烈。

2.4 不同植被类型植被覆盖度的变化特征

利用 ArcGIS 10.2 空间提取功能,以 2000 年植被类型图为基础,提取福建省各市区植被类型的比例,研究表明,福建省各地市植被类型以针叶林、阔叶林为主,但各市区不同植被类型的组成比例不同。

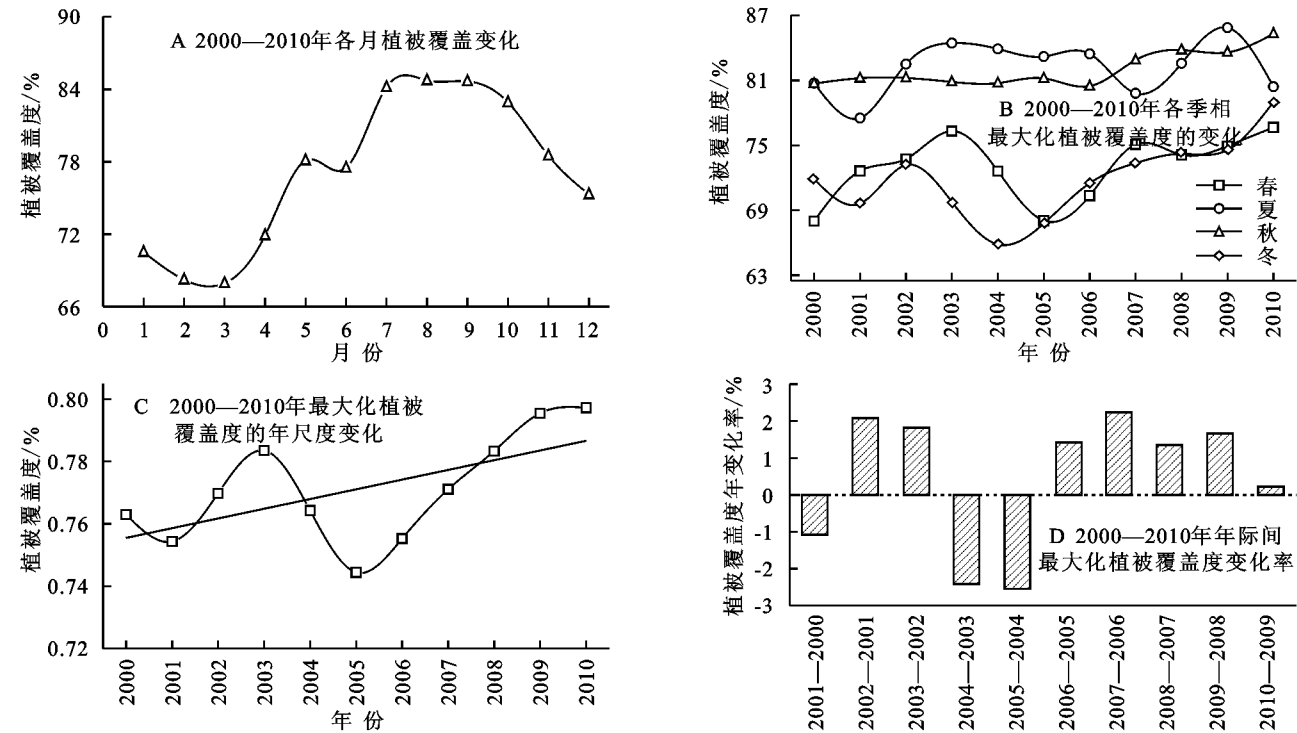


图 1 福建省植被覆盖度时间变化分析

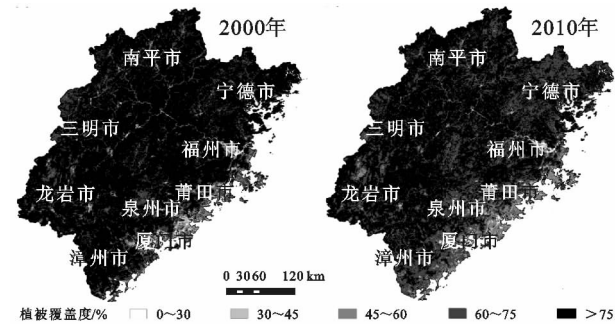


图 2 福建省 2000 年、2010 年植被覆盖度对比

表 1 不同植被覆盖等级变化

植被覆盖度/%	植被覆盖等级	植被覆盖度百分比/%		2000—2010 年的转化量
		2000 年	2010 年	
<30	低植被覆盖度	0.33	0.22	-0.11
30~45	中低植被覆盖度	0.88	1.02	0.14
45~60	中植被覆盖度	4.77	3.02	-1.74
60~75	中高植被覆盖度	28.47	14.35	-14.11
>75	高植被覆盖度	65.54	81.38	15.84

为进一步探究不同植被类型覆盖度的变化特征,应用 ArcGIS 10.2 空间统计工具,对福建省 2000—2010 年植被覆盖进行提取,研究表明:福建省过去近 11 a 间各植被类型植被覆盖度均值介于 0.596~0.799,近 11 a 植被覆盖度的增加量依次为:湿地>草地>农作物>非植被>阔叶林=针叶林(表 3)。不同植被类型植被覆盖度

针叶林组成比例由高到低依次为:龙岩市>三明市>泉州市>南平市>福州市>莆田市>宁德市>厦门市>漳州市;阔叶林组成比例为:宁德市>南平市>福州市>漳州市>龙岩市=三明市>莆田市>泉州市>厦门市。

在年际变化尺度呈现稳步增加的趋势,各植被类型植被覆盖度的最低值均出现在 2005 年、2005 年后各植被类型植被覆盖度持续增加(图 4),福建省 2004—2005 年的快速区域城市化发展可能是造成植被覆盖最低的主要因素。针叶林和非植被区域标准差最低,表明针叶林区和非植被区植被覆盖度变化整体稳定。湿地所在区域标准差最大,表明湿地区域植被覆盖波动较大。由于湿地生态系统的重要性,近 11 a 来福建省以湿地为背景的公园得到快速发展,使得湿地区域植被盖度变化较为明显。

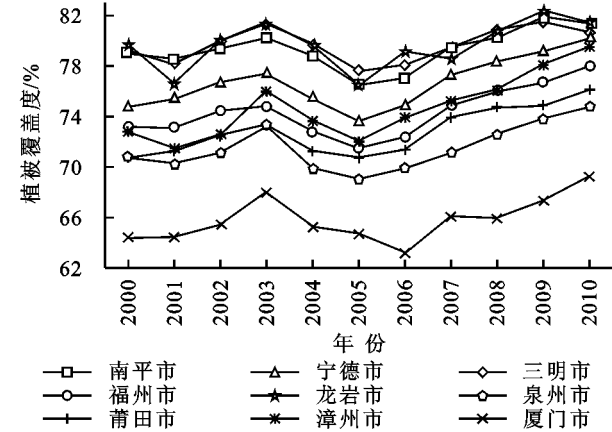


图 3 不同区域植被覆盖度随时间的变化

表 2 不同区域 3 个时段植被覆盖变化情况

市区	植被覆盖度/%			植被覆盖变化率/%		
	2000 年	2005 年	2010 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2000—2010 年
福建省	76.29	74.44	79.72	−1.8555	5.2824	3.4270
南平市	78.99	76.56	81.36	−2.4320	4.8001	2.3681
宁德市	74.76	73.60	80.20	−1.1594	6.6025	5.4431
三明市	79.19	77.59	80.70	−1.6003	3.1089	1.5085
福州市	73.20	71.50	78.09	−1.7044	6.5879	4.8834
龙岩市	79.70	76.45	81.40	−3.2482	4.9523	1.7041
泉州市	70.67	69.02	74.81	−1.6571	5.7969	4.1397
莆田市	70.79	70.75	76.17	−0.0351	5.4192	5.3841
漳州市	72.80	72.03	79.52	−0.7683	7.4916	6.7232
厦门市	64.34	64.70	69.33	0.3613	4.6351	4.9964

表 3 不同植被类型区植被覆盖度变化及基本统计量

植被类型区	2000 年植被覆盖度/%	2010 年植被覆盖度/%	2000—2010 年增加量	平均值	标准差	k
针叶林	78.9	81.8	0.029	0.796	0.017	0.003
阔叶林	79.4	82.3	0.029	0.799	0.018	0.003 *
草地	75.4	80.3	0.049	0.767	0.021	0.004 **
农作物	69.9	74.2	0.043	0.708	0.018	0.003 *
湿地	61.8	70.3	0.085	0.652	0.026	0.006 **
非植被	59.0	62.8	0.037	0.596	0.017	0.002

注:(1) * 表示通过 0.05 显著性检验, ** 表示通过 0.01 显著性检验;(2) k 为植被覆盖随时间变化的回归系数。

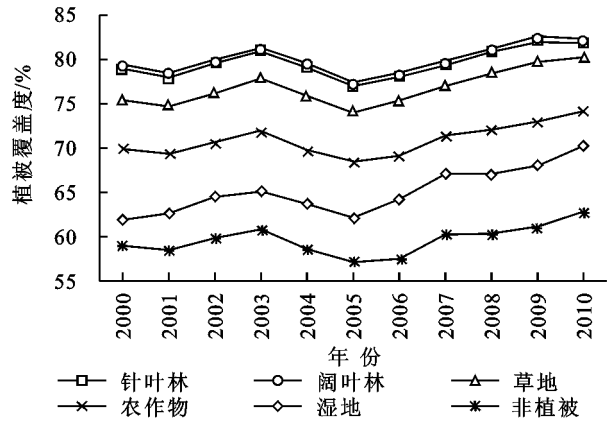


图 4 2000—2010 年福建省不同植被类型的植被覆盖度变化情况

长的转折点,福建省对水土流失的治理是动态变化的过程,政府提出植树造林、封山育林等政策产生成效有一定的滞后性。

(3) 本研究为探讨福建省植被覆盖的空间变化特征,分别以各市区及各植被类型区为最小分析单元进行分析,研究表明,各市区植被覆盖度以增加为主,其中三明市、龙岩市的植被覆盖度增加较低,主要由于两个区域历史上水土流失最为严重,水土流失最长的长汀县位于龙岩市,严重的水土流失会造成区域土壤环境遭到严重破坏^[20],直接影响植被的生存、生长,进而影响植被盖度的大小。2000—2010 年,福建各林区植被覆盖度变化基本一致—稳步增加,此变化可能与其所在林型及福建省的降水和温度密切相关^[37],福建省植被以阔叶、针叶林为主,阔叶、针叶林更能适应当地的气候变化,湿地、非植被等区域受当地气候影响较大因此同时期针叶林、阔叶林的植被盖度大于湿地、非植被区植被盖度。

(4) 本研究选取 2000 年植被类型代替 2000—2010 年植被类型,虽然存在一定的误差,但鉴于福建的气候及政府的管理条件^[38],2000—2010 年植被类型未发生很大变化,且植被类型在自然状态下发生的变化是一个漫长的过程^[37],本研究的时间跨度为 11 a 不会对植被类型造成很大的影响,因此 2000 年植被类型在本研究具有一定的适用性。但目前很多研

3 结论与讨论

(1) 本研究通过 slope 趋势分析和 Mann-Kendall 趋势检验法,探究福建省植被覆盖度时空变化,研究表明福建省植被覆盖度 2000—2010 年整体呈增加趋势,说明自 2000 年政府提出植树造林、退耕还林、封山育林等水土保持政策^[34-36]取得明显成效。

(2) 从植被盖度时间变化特征可知,2000—2010 年植被覆盖度变化趋势可将植被覆盖分为 2000—2005 年明显波动,2005—2010 年持续增加两个阶段,2005 年植被覆盖最低,该结论与张春桂^[18]等的研究一致,说明 2005 年为植被覆盖由动态变化向稳步增

究表明,植被覆盖度的变化受人活动、地形条件、气象因子等多因素共同影响^[39-40],本研究只是对福建省的植被覆盖度时空特点进行分析,没有考虑导致植被变化的驱动因子,这也是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,80(1):76-87.
- [2] 甘春英. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. *地理科学*, 2011,31(8):1019-1024.
- [3] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985,6(8):1335-1372.
- [4] Wang G, Wentz S, Gertner G Z, et al. Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002,23(18):3649-3667.
- [5] Cao L, Xu J, Yang Y. Vegetation Coverage Change Trend in Inner Mongolia of China during 1998—2008[M]// *Advances in Computer Science, Intelligent System and Environment*. Springer Berlin Heidelberg, 2011(106):159-163.
- [6] 苗正红,刘志明,王宗明,等. 基于 MODIS NDVI 的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J]. *遥感技术与应用*, 2010,25(3):387-393.
- [7] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013,33(5):889-897.
- [8] 陈云浩,李晓兵,史培军,等. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究[J]. *植物生态学报*, 2001,25(5):588-593.
- [9] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004,26(4):153-159.
- [10] Peng J, Liu Y, Shen H, et al. Vegetation coverage change and associated driving forces in mountain areas of North-western Yunnan, China using RS and GIS[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2012,184(8):4787-4798.
- [11] Deng-Ke L I, 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.
- [12] 邵霜霜,师庆东. 基于 FVC 的新疆植被覆盖度时空变化[J]. *林业科学*, 2015,51(10):35-42.
- [13] 王莉雯,卫亚星,牛铮. 基于遥感的青海省植被覆盖时空变化定量分析[J]. *环境科学*, 2008,29(6):1754-1760.
- [14] 张宝庆,吴普特,赵西宁. 近 30 年黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. *农业工程学报*, 2011,27(4):287-293.
- [15] 张东海,任志远,王晓峰,等. 基于 MODIS 的陕西黄土高原植被覆盖度变化特征及其驱动分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2013,29(1):29-35.
- [16] 李双双,延军平,万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012,67(7):960-970.
- [17] 相莹莹,黄麟,曹巍,等. 陕甘宁地区退耕还林/草的生态成效分析[J]. *安徽农业科学*, 2014(17):5524-5528.
- [18] 张春桂,潘卫华,陈惠,等. 利用多时相中分辨率卫星影像监测福建省植被覆盖变化[J]. *遥感技术与应用*, 2007,22(5):613-617.
- [19] 彭璐,李小明,傅佳丽,等. 福建省平潭岛植被覆盖变化及其对地表温度影响的定量研究[J]. *福建师范大学学报:自然科学版*, 2016,32(1):78-85.
- [20] 张灿,徐涵秋,张好,等. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J]. *自然资源学报*, 2015,30(6):917-928.
- [21] 徐涵秋,陈本清. 厦门市植被变化的遥感动态分析[J]. *地球信息科学*, 2003,5(2):105-108.
- [22] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. *林业资源管理*, 2014(1):1-2.
- [23] 陈志强,陈志彪,陈明华. 福建省水土流失强度的地统计分析[J]. *自然资源学报*, 2011,26(8):1394-1400.
- [24] 史世莲,章文波,王国燕. 北京地区植被盖度提取及其分布变化研究[J]. *遥感技术与应用*, 2014,29(5):866-872.
- [25] 李小亚,张勃,靳自宝. 基于 MODIS-NDVI 的甘肃河东区植被覆盖度动态监测[J]. *水土保持研究*, 2013,20(1):112-115.
- [26] 王冬梅,孟兴民,邢钊,等. 基于 RS 的武都区植被覆盖度动态变化及其驱动力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012,26(11):92-97.
- [27] 成军锋,贾宝全,赵秀海,等. 干旱半干旱地区植被覆盖度的动态变化分析:以毛乌素沙漠南部为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2009,23(12):172-176.
- [28] 丁关青,陈松岭,郭云开. 基于遥感的土地复垦植被覆盖度评价[J]. *中国土地科学*, 2009,23(11):72-75.
- [29] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003,24(5):1111-1117.
- [30] 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.
- [31] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. *Journal of Hydrology*, 1998,204(1/4):182-196.
- [32] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data [J]. *Water Resources Research*, 1982,18(18):107-121.

- [5] 王君. 遥感干旱监测研究进展[J]. 科技信息, 2014(14): 109-112.
- [6] Goward S N, Hope A S. Evapotranspiration from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation; Preliminary FIFE results from AVHRR data [J]. *Advances in Space Research*, 1989, 9(7): 239-249.
- [7] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940-948.
- [8] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [9] Nemani R, Pierce L, Running S, et al. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(3): 548-557.
- [10] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263.
- [11] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [12] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 473-478.
- [13] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 年干旱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014(4): 677-688.
- [14] 杨秀海, 卓嘎, 罗奄. 基于 MODIS 数据的西北地区旱情监测[J]. *草业科学*, 2011, 28(8): 1420-1426.
- [15] Heim Jr R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1149-1165.
- [16] 朱国锋, 蒲焱, 何元庆, 等. 横断山区土壤相对湿度时空分异[J]. *地理科学*, 2016, 32(7): 872-877.
- [17] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. *遥感学报*, 2003, 7(5): 420-427.
- [18] 杨嚷, 武建军, 闰峰. 基于地表温度植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1205-1216.
- [19] 王纯枝, 毛留喜, 何延波, 等. 温度植被干旱指数法(TVDI)在黄淮海平原土壤湿度反演中的应用研究[J]. *土壤通报*, 2009(5): 998-1005.
- [20] 张洁, 武建军, 周磊, 等. 基于 MODIS 数据的农业干旱监测方法对比分析[J]. *遥感信息*, 2012(5): 48-54.
- [21] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J]. *地理科学*, 2013, 34(7): 882-888.
- [22] 蔡新玲, 叶殿秀, 李茜, 等. 基于 CI 指数的陕西干旱时空变化特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 1-8.
- [23] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(2): 97-103.
- [24] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 752-760.
- [25] 方建刚, 白爱娟. 陕西春季干旱的环流特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(5): 247-253.
- [26] 杨新. 陕西干旱灾害特征分析[J]. *陕西气象*, 1998(4): 22-25.
- [27] 高雪玲, 刘康, 康艳, 等. 秦岭山地生态系统服务功能价值初步研究[J]. *中国水土保持*, 2004(4): 19-21.

~~~~~  
(上接第 239 页)

- [33] 陈学兄, 张小军, 陈永贵, 等. 陕西省 1998—2008 年植被覆盖度的时空变化研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(6): 674-678.
- [34] 陈增文. 基于 NDVI 的生态环境变化分析: 以福建省龙岩市长汀县为例[J]. *化学工程与装备*, 2012(6): 204-207.
- [35] Wang Z, Daun C, Li Y, et al. Assessment of the restoration of a degraded semi-humid evergreen broadleaf forest ecosystem by combined single-indicator and comprehensive model method[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(6): 757-767.
- [36] Deng L, Shangguan Z P, Rui L I. Effects of the grain-for-green program on soil erosion in China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(1): 120-127.
- [37] 徐凯健, 曾宏达, 张仲德, 等. 亚热带福建省森林生长季与气温、降水相关性的遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(10): 1249-1259.
- [38] Cai H, Yang X, Wang K, et al. Is forest restoration in the southwest China karst promoted mainly by climate change or human-induced factors [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9895-9910.
- [39] Qin C, Li J Y, Chen H F, et al. Temporal and Spatial Evolution of Vegetation Cover and Its Relationship With Climate Factors in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(1): 108-114.
- [40] 戴声佩, 张勃, 王海军. 中国西北地区植被 NDVI 的时空变化及其影响因子分析[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(3): 315-321.