

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.039

基于 TAVI 的长汀县植被覆盖度时空变化研究

汪小钦^{1,2} 刘亚迪^{1,2} 周伟东^{1,2} 林敬兰³

(1. 福州大学空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室, 福州 350002;

2. 福建省空间信息工程研究中心, 福州 350002; 3. 福建省水土保持试验站, 福州 350003)

摘要: 植被覆盖度(FVC)是指示生态环境状态的重要参数,开展区域 FVC 估算与分析对于科学决策具有重要意义。利用 1988—2013 年 5 个时期的 Landsat 系列遥感数据,引入地形调节植被指数 TAVI 来估算 FVC,有效消除了阴坡和阳坡由于地形不同造成的差异。研究结果表明:长汀县植被覆盖情况总体良好,中高以上植被覆盖度区域占全县面积的 65% 以上,植被覆盖度较高区域主要分布在县域周边;中低以下植被覆盖度区域不到全县面积的 15%,主要分布在中部沿汀江两岸的水土流失严重乡镇。1994 年植被覆盖度最差,1988—1994 年植被覆盖度降低幅度较大,在全县各乡镇都有分布,主要与 1993—1994 年冬季的严重霜冻有关;1994 年后,植被覆盖度逐步提高,2003 年以后,植被覆盖度增长较快,尤其是中部原水土流失严重乡镇的植被覆盖度显著改善。长汀县植被覆盖度的变化情况与地方政府对水土流失治理的投入强度密切相关,特别是 2000 年以来的高强度投入与治理,极大地改善了当地的植被覆盖状况。

关键词: 植被覆盖度; 地形调节植被指数; 时空变化; 长汀县

中图分类号: TP79; Q948.15⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0289-08

Research on Temporal and Spatial Variation of Fractional Vegetation Cover in Changting County Based on TAVI

Wang Xiaoqin^{1,2} Liu Yadi^{1,2} Zhou Weidong^{1,2} Lin Jinglan³

(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing, Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

2. Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou 350002, China

3. Soil and Water Conservation Experimental Station of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Fractional vegetation cover (FVC) is one of key indicators for the change of ecological environment. Estimation and analysis on regional FVC is of great significance for local government. In this paper, remote sensing technology was used to study FVC, and spatial-temporal FVC variation was analyzed from 1988 to 2013. Five periods of Landsat series remotely sensed data acquired in 1988, 1994, 2003, 2010 and 2013 were used to estimate the FVC based on topography-adjusted vegetation index (TAVI). TAVI can effectively eliminate the discrepancy between the shady and sunny slopes, and FVC calculated from TAVI can improve the estimation accuracy of the shady slopes. The vegetation coverage from 1988 to 2003 was generally well. The area percentage of FVC values which are larger than 0.6, were more than 65%, lying in the surrounding areas of the county. In most of the west and the north area, the FVC was larger than 0.8. The area percentage of FVC values less than 0.4 was less than 15%, mainly lying in the middle area along the Tingjiang River, which are also the most serious towns of soil erosion area. The worst FVC value occurred in 1994, which was decreased from 1988 and distributed in most of the towns, due to the serious frost occurred in the winter of the end of 1993 and the beginning of 1994. From 1994, the vegetation coverage was improved, and in 2003, the vegetation coverage

收稿日期: 2015-06-04 修回日期: 2015-09-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAC08B01)、福建省科技计划重点项目(2015N0025)和福建省教育厅 A 类重点科技项目(JA12022)

作者简介: 汪小钦(1972—),女,研究员,博士,主要从事资源环境遥感应用研究,E-mail: wangxq@fzu.edu.cn

recovered the level of that in 1988. From 2003 to 2013, the FVC was improved remarkably and most of the barren lands in the middle area are now covered with vegetation. The vegetation coverage has greatly been improved in the middle serious soil erosion towns particularly. The FVC changes are closely related to investment intensity for the control of soil erosion performed which was leaded by the local government. Due to the great efforts for treatment of soil erosion from 2000, a notable increase of FVC occurred from 2003 to 2013.

Key words: fractional vegetation cover; topography-adjusted vegetation index; temporal and spatial variation; Changting County

引言

植被覆盖度 (Fractional vegetation cover, FVC) 通常定义为植被在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[1], 是指示生态环境状态的重要参数, 在植被变化监测、生态环境调查与评价、水土保持等诸多研究领域都有广泛的应用^[2]。区域及全球范围的 FVC 估算对水文、生态、全球变化等相关领域的研究具有十分重要的意义。

遥感由于具有大范围的数据获取和连续观测能力, 已经成为地表 FVC 估算的重要手段^[3-4]。利用 NOAA AVHRR、MODIS、SPOT VEGETATION 等传感器的植被指数产品估算 FVC 主要用于分析较大区域范围植被覆盖时空变化规律^[5-8]。对于较小的区域范围, 则更多利用 TM、SPOT 等中高空间分辨率的遥感数据来估算 FVC^[9-16]。基于植被指数的 FVC 估算方法是最常用的方法, 其中归一化植被指数 NDVI 的应用最多。但在丘陵山地区域, 由于地形的影响, 使得阴坡植被指数较阳坡低; 另外由于阴影的影响, 会导致对植被密度较高区域周围零散分布的植被覆盖度估算结果过高^[17-18]。针对地形的阴影消除, 江洪等^[19-21]提出了地形调节植被指数 (Topography-adjusted vegetation index, TAVI), 该指数利用遥感影像本身的信息, 采用非线性组合的方法实现对山体阴坡部分植被指数的非线性补偿, 对山体阳坡部分植被指数值的非线性压制, 有效降低了植被指数与太阳入射角余弦值的相关性, 恢复植被指数在山区复杂地形区域的合理分布。TAVI 在多种地形条件下都有明显的抗地形效果^[22], 利用 TAVI 估算 FVC, 能有效提高阴坡区域的估算精度, 减少阴坡和阳坡仅由于地形差异造成的 FVC 不同^[23]。

福建省长汀县是中国南方红壤地区的典型水土流失区, 从 20 世纪 80 年代以来, 以长汀县为重点的水土流失综合治理成为福建省水土保持工作的重点。经过 30 余年的治理, 长汀县的地表覆盖和生态环境发生了重大变化。江洪等^[24]估算了长汀县

1994 年和 2003 年的植被覆盖度, 研究表明从 1994—2003 年研究区高植被覆盖面积增加了 150.47 km²。张灿等^[16]估算了长汀县 2001、2004、2013 年的植被覆盖度, 认为从 2001—2004 年 FVC 略有下降, 而 2004—2013 年则大幅增加, 平均 FVC 从 72.1% 增加到 86.5%, 增加的主要区域集中在中部的河田盆地。河田盆地平均 FVC 从 1988 年的 48.83% 上升到 2010 年的 59.78%^[12]。

本文利用 1988—2013 年 5 个时期的 Landsat 系列遥感数据, 基于 TAVI 估算植被覆盖度, 分析长汀县 25 a 来 FVC 的时空变化, 为长汀县水土流失治理和决策提供参考。

1 研究区及遥感数据

1.1 研究区概况

福建省长汀县位于福建省西部山区 (图 1), 25°18'40"~26°02'05"N, 116°00'45"~116°39'20"E, 全县总面积 3 089.9 km²。汀江横贯其境内的中西部且地处武夷山脉南段, 武夷山脉在其境内支脉纵横交错延伸, 全县境内地形复杂, 地势自北向南倾斜, 85% 的地区为山地丘陵地貌且以中山地丘陵为主, 地势陡峭。该县境内的成土母岩以花岗岩为主, 加上中亚热带季风性气候雨量充沛、但年内分配不均的特点, 风化作用十分强烈, 易受侵蚀。该县的地貌特点、成土母岩的岩性和气候环境决定了该坡地

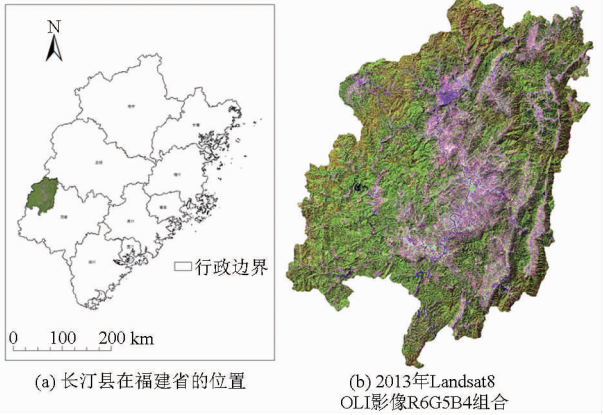


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

资源生态环境的脆弱性,加上近百年来人为破坏使得长汀县成为我国南方红壤区水土流失最为严重的县域之一。1983 年,福建省把长汀县列为水土流失治理试点;2000 年,又把长汀水土流失治理列入为民办实事项目;2012 年开始,又掀起了新一轮的水土流失治理。历经数代人长期努力,长汀县水土流失区的生态环境和城乡面貌发生了巨大的变化。

1.2 遥感数据及预处理

用于时间序列分析的遥感数据为 Landsat 系列的多光谱遥感数据,空间分辨率 30 m,具体数据如下:1988-10-16 的 Landsat TM、1994-11-02 的 Landsat TM、2003-10-26 的 Landsat TM、2010-10-29 的 Landsat TM 和 2013-10-04 的 Landsat OLI。数据获取时间都在秋季,以 10 月份为主,季相造成的植被覆盖差异可以忽略。参考的遥感数据为 2010-03-28 的 ALOS AVNIR-2 多光谱影像,空间分辨率为 10 m。

为了消除大气的影 响,利用 ENVI 软件提供的 FLAASH 大气校正模块对几期影像进行大气校正。然后以基于 1:50 000 地形图校正的 ALOS AVNIR-2 影像为参考,对用于动态监测的 5 期 Landsat 系列影像进行几何校正,误差控制在 0.5 个像元,并按照行政区域边界裁剪出研究区的范围。

2 研究方法

2.1 TAVI 计算与抗地形效果分析

地形调节植被指数 TAVI 具体公式为^[19-21]

$$V_{TAVI} = V_{NDVI} + f(\Delta) \frac{M_r - R}{R}$$

(1)

式中 V_{TAVI} ——TAVI 值

V_{NDVI} ——NDVI 值

$f(\Delta)$ ——地形调节因子

M_r ——研究区内红光波段最大值

R ——红光波段值

$f(\Delta)$ 值的确定尤为关键,本文采用极值优化的算法获得。具体的求解步骤依次为分类、目标识别、优化匹配。分类的目的是将影像中的阴坡和阳坡区分开;在此基础上分析阴坡与阳坡植被覆盖的均质性,选出阴坡、阳坡间植被覆盖程度相当的区域及其空间分布范围;最后,令 $f(\Delta)$ 从 0 开始,依次递增,在变化的过程中对植被覆盖程度相当的阴坡与阳坡的植被指数值进行监测,当两者数值基本相等时,即获得 $f(\Delta)$ 的最优结果^[19-20]。

图 2 为基于 ALOS AVNIR-2 影像计算得到的局部区域 NDVI 和 TAVI 对比,从左到右依次为原始 ALOS AVNIR-2 影像、NDVI 灰度图像和 TAVI 灰度

图像,灰度图像色调越亮表示植被指数越大。TAVI 和 NDVI 两者总体分布相似,主要区别在山体的阴坡和阳坡。对比多光谱图像,NDVI 灰度图像地形纹理清晰明显,而 TAVI 灰度图像中没有明显的地形纹理。同时,TAVI 灰度图像中的其他地物的真实特征并未改变。使用 TAVI 指数能在有效消除地形干扰的同时保证其他地物特征得到较真实反映。与 NDVI 相比,利用 TAVI 估算 FVC,能够减少仅由于地形造成的阴坡和阳坡数值的差异,提高阴坡 FVC 的估算精度。基于 NDVI 估算的 FVC 阴坡和阳坡差异大部分在 10%~30%,而基于 TAVI 估算的 FVC 阴坡和阳坡的差异都小于 15%^[23]。

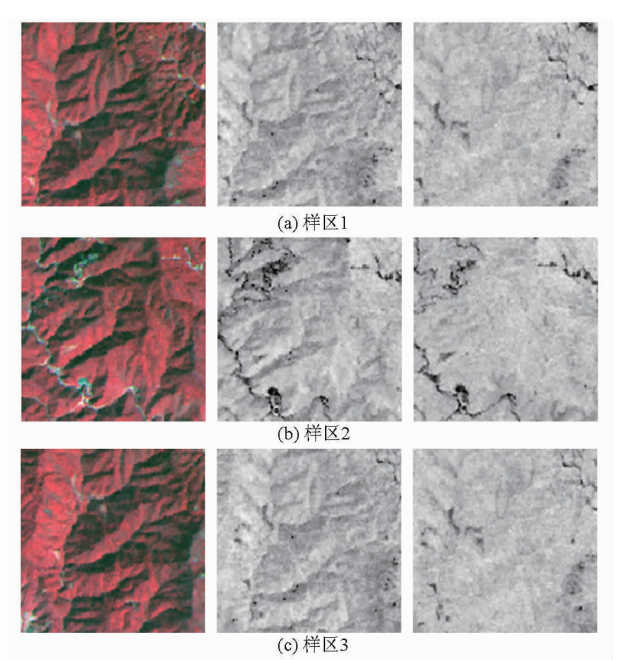


图 2 局部区域植被指数分布

Fig. 2 Subset images of vegetation indexes

2.2 基于像元二分模型的 FVC 估算

像元二分模型对 FVC 估算应用广泛,计算方法简便,结果可靠。该方法以混合像元线性分解为基础,假设一个像元的信息 S 可被分解为土壤 S_s 和植被 S_v 两部分,有植被覆盖的面积百分比即该像元的植被覆盖度 f_c ,而土壤覆盖面积的百分比就为 $1 - f_c$ 。假设像元信息全由植被成分贡献的像元遥感信息为 S_v ,全裸土的纯像元所得遥感信息为 S_s ,每个像元中这 2 部分的权重为它们 在像元中所占百分比。进行变换后可得计算 FVC 的公式^[25]

$$f_c = \frac{S - S_s}{S_v - S_s}$$

(2)

式中 f_c ——植被覆盖度

S ——TAVI 值

S_s ——全裸土的 TAVI 值

S_v ——全植被覆盖的 TAVI 值

利用式(2)计算 FVC,并分为 10 个等级(图 3)。与 2013 年 11 月的野外实地考察相比,2013 年的估算结果阳坡平均误差为 11.5%,阴坡平均误差为 14.1%,估算精度大于 85%,可以满足实际应用需求。

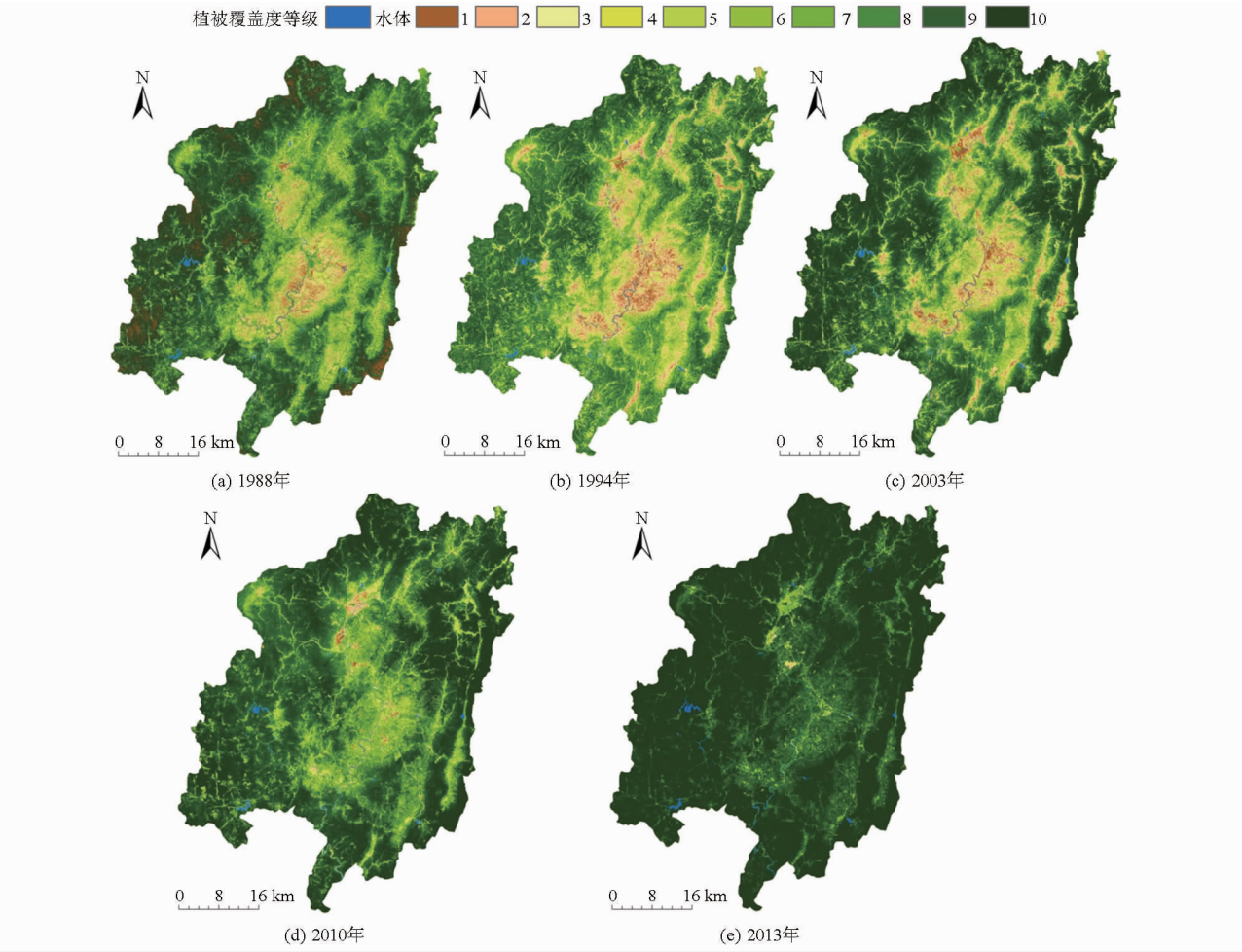


图 3 1988—2013 年长汀县 FVC 空间分布图
Fig. 3 Distribution of FVC in Changting County from 1988 to 2013

3 结果与讨论

3.1 面积变化

从图 3 可以看出,长汀县高植被覆盖度区域主要分布在县境内西部、北部地区;中、低植被覆盖度区域主要分布在县境内中部、南部部分地区。中部地区 1988 年和 1994 年的植被覆盖度以中、低为主;从 2003 年起情况得到不断改善,逐渐由低、中植被覆盖度向中、高植被覆盖度转变,至 2013 年,大部分中部地区的中、低植被覆盖度已转变为高植被覆盖度。FVC 的空间分布,与江洪等^[24](1994、2003 年)、张灿等^[16](2013 年)相应年份的空间分布非常一致。

统计不同等级 FVC 的面积分布情况(不统计土地利用类型为居民地、水体等与土壤和植被无关的区域)如表 1、图 4 所示。图 4 中,低、中低、中等、中高和高植被覆盖度分别指 FVC 处于(0,0.2]、(0.2,0.4]、(0.4,0.6]、(0.6,0.8]、(0.8,1.0]。

表 1 长汀县 1988—2013 年不同 FVC 等级面积
Tab.1 Areas in different FVC levels from 1988 to 2013
km²

FVC 等级 (区间)	面积				
	1988 年	1994 年	2003 年	2010 年	2013 年
1 (0,0.1]	34.286	63.629	58.984	10.360	0.176
2 (0.1,0.2]	57.373	151.502	95.306	13.241	1.483
3 (0.2,0.3]	79.380	182.372	133.709	28.949	3.301
4 (0.3,0.4]	102.820	182.261	155.531	57.567	5.141
5 (0.4,0.5]	143.003	209.282	160.806	113.188	10.400
6 (0.5,0.6]	222.584	288.187	190.278	189.383	22.799
7 (0.6,0.7]	378.083	451.742	268.981	278.565	56.930
8 (0.7,0.8]	568.030	681.073	453.823	447.133	161.068
9 (0.8,0.9]	837.871	711.018	785.149	905.775	517.583
10 (0.9,1.0]	663.268	163.019	785.687	1 030.267	2 282.540

从图 4、表 1 可以看出,长汀县的植被覆盖情况总体较好,以中高以上植被覆盖度为主,占全县面积的 65% 以上;中低和低植被覆盖度所占的比重很小,少于 15%。1988—1994 年,高植被覆盖度面积

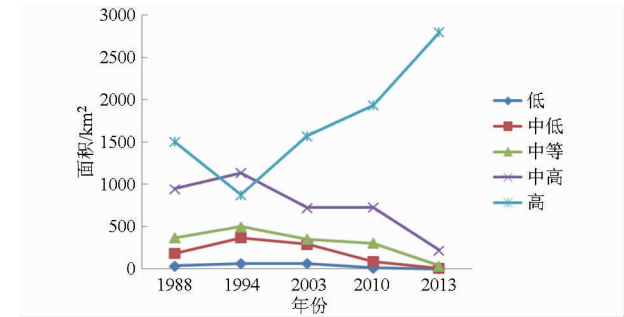


图 4 1988—2013 年植被覆盖度面积变化
Fig. 4 Areas of FVC from 1988 to 2013

减少,其他植被覆盖度情况面积增大;1994 年以后,高植被覆盖度面积均呈现增长趋势,其他植被覆盖度面积均逐渐减少。

从 5 个年份的估算结果比较,1994 年长汀县植被覆盖情况最差,低植被覆盖度区域面积 1994 年最大;2013 年情况最好,低植被覆盖度区域面积最少;1988 年和 2003 年植被覆盖情况相当。高植被覆盖度区域的面积 25 a 来增长显著,主要在 2003 年以后,发生在县城中部水土流失严重的区域。1988 年,全县境内的高植被覆盖度区域总面积为 1 501. 139 km², 占全县国土总面积的 48. 6%;1994 年高植被覆盖度区域的下降较为明显,仅占 28. 3%;2003 年,高植被覆盖度区域的面积恢复至与 1988 年相当的水平,在随后的 10a 中,高植被覆盖度区域面积增长迅速,增长的面积约占全县面积的 40%,主要分布在中部各乡镇。说明从 2000 年长汀县的水土流失治理被列入为民办实事以来,长汀县水土流失治理成效显著,地表植被覆盖情况得到很大的改善。

3.2 空间变化

为研究长汀县境内 25 a 间其植被覆盖度空间变化的情况,将 1988—2013 年间 5 个年份的 FVC 相邻年份两两进行空间分析,获得了相邻年份之间 FVC 空间变化分布(图 5),图中红色调区域代表植被覆盖度降低,白色为基本不变区域,绿色调区域代表植被覆盖度增加。

图 5a 为 1988—1994 年 FVC 变化的空间变化,可以看出植被覆盖度在全县境内总体呈现降低的趋势,并且全县范围的大部分乡镇都有分布。中部的河田镇与濯田镇部分区域植被覆盖度降低幅度超过 60%,其他乡镇植被覆盖度降低幅度主要在 20% ~ 60% 之间。FVC 等级降低面积较大的乡镇主要有大同镇、新桥镇、策武乡、河田镇、濯田镇、南山镇等乡镇。西部地区的红山乡、四都镇、古城镇等乡镇及北部地区的铁长乡、庵杰乡 2 个乡镇,FVC 等级变化区域相对较小。

图 5b 为 1994—2003 年 FVC 变化的空间分布情况。全县境内大多数区域的植被覆盖度均有明显的改善,提高的幅度主要在 20% ~ 60% 之间,其中河田镇、三洲镇、濯田镇 3 个乡镇的 FVC 等级提高的区域较大,该区域是长汀县水土流失治理工作的重点区域,从植被覆盖度等级变化的空间分布来看,治理初见成效。

图 5c 为 2003—2010 年 FVC 变化的空间分布情况。在这 7 a 间,西部地区的植被覆盖情况变化不大,而策武乡、河田镇、三洲镇、濯田镇、新桥镇、涂坊镇、南山镇、新桥镇等几个乡镇,FVC 数值增长十分显著,变化的面积较大。其中三洲镇境内植被覆盖度好转的区域分布在整个镇内,河田镇的植被覆盖度好转的区域面积超过全镇面积的三分之二,变化最为明显。

图 5d 为 2010—2013 年 FVC 变化的空间分布情况。其总体分布与 2003—2010 年间的变化情况类似,植被覆盖度等级变化较为明显的地区仍然集中在长汀县的中部地区。但河田镇、策武乡境内部分区域出现植被覆盖度等级降低的情况,根据实地调查的结果显示,这主要是由于建设用地面积的增加造成的。

从各个时期得到的植被覆盖度等级变化的空间分布图上可以看出,25 a 来,长汀县境内的北部和西部山区,植被覆盖情况很好,植被覆盖度的变化不明显,变化幅度小于 20% 且变化的面积较小;中部地区和南部地区的少数乡镇,是植被覆盖度等级变化最明显的地区,从 1994—2013 年,植被覆盖度等级不断提高,策武乡、河田镇、三洲镇等几个原水土流失严重乡镇的植被覆盖度改善情况最为显著。特别 2003—2013 年的 10 a 间,植被覆盖程度显著提高,与张灿等^[16]的 2004—2013 年的变化趋势相吻合。

3.3 讨论

长汀县 FVC 的空间和面积变化,与多方面的因素有关,其中政策因素导致的水土流失治理起了重要作用。1994 年植被覆盖度较差主要有 2 方面的原因:一是 1993 年底至 1994 年初的冬季,长汀县境内的严重霜冻对植被的生长造成较大的影响;二是 90 年代初期,在经济利益的驱动下,水土流失治理由原来以生态效益为主转为生态和经济效益并重,使得大量的林地被开垦为园地。因此,1988—1994 年,植被覆盖度降低的区域分布在全县的各个乡镇,区域差异不是很大。从 2000 年开始,福建省把以长汀县为重点的水土流失综合治理列入为民办实事项目之一,连续 10 a 资助 1 亿多元资金开展治理。2011 年底,进一步推动了各级政府对长汀县水土流

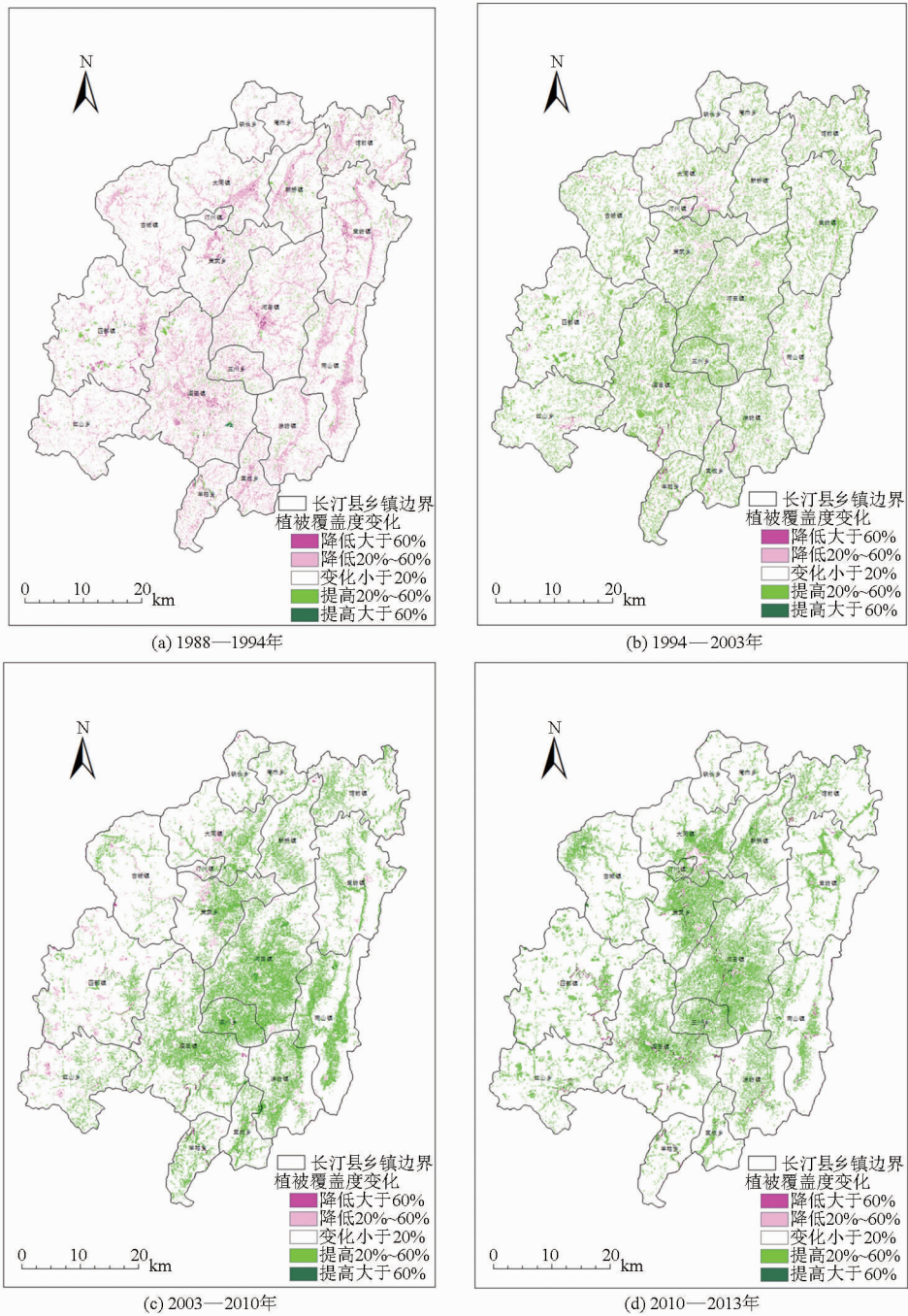


图 5 1988—2013 年 FVC 空间变化

Fig. 5 Spatial distribution of FVC from 1988 to 2013

失治理的投入。因此,长汀县从 2003 年以来,植被覆盖情况得到极大改善,特别是在中部原水土流失严重的乡镇。

4 结论

(1)利用地形调节植被指数 TAVI 估算区域 FVC,能有效地减少阴坡和阳坡的差异,提高阴坡的估算精度。

(2)长汀县境内 FVC 以中高植被覆盖度以上为主,主要分布在县域四周各乡镇,中低植被覆盖度以下所占的比例很少,主要分布在中部各乡镇,尤其是

沿汀江两岸的策武乡、河田镇、三洲镇和濯田镇 4 个水土流失严重乡镇。

(3)长汀县 1994 年植被覆盖度最差,2013 年植被覆盖度最好。1988—1994 年植被覆盖度降低,降低的区域在全县各个乡镇都有分布,主要由于 1993—1994 年冬季严重的霜冻对植被生长造成了较大的影响;1994 年以后,植被覆盖情况开始恢复与好转,到 2013 年,高植被覆盖度区域的增加面积约占全县面积的 40%,植被增长最为显著的区域是中部原水土流失严重的几个乡镇。

(4)25 a 来,长汀县植被覆盖情况的时间变化

和空间分布与地方政府对水土流失治理的投入强度密切相关,尤其是 2000 年以后持续的高强度投入,极大地改善了当地水土流失严重区域的植被覆盖度。

(5)在 25 a 中,利用 5 个年份的数据是不够的,但目前仅获得 5 个季相相同的影像。在南方多云多

雨地区,中高空间分辨率光学遥感数据的获取受到一定的限制,很难保证数据获取季相的一致性。如何对不同季相进行校正或归一化处理,保证不同年份的数据具有可比性,是建立中高空间分辨率、长时间序列、短时间间隔数据的基础,从而更有利于分析植被时间序列的变化。

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 包刚, 包玉海, 覃志豪, 等. 高光谱植被覆盖度遥感估算研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1243 – 1254.
Bao Gang, Bao Yuhai, Qin Zhihao, et al. Hyper-spectral remote sensing estimation for the vegetation cover[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1243 – 1254. (in Chinese)

3 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774 – 781.
Jia Kun, Yao Yunjun, Wei Xiangqin, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 774 – 781. (in Chinese)

4 程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J]. 国土资源遥感, 2008(1): 16 – 21.
Cheng Hongfang, Zhang Wenbo, Chen Feng. Advances in researches on application of remote sensing method to estimating vegetation coverage[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008(1): 16 – 21. (in Chinese)

5 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, 715.
Chen Xuexiong, Zhang Xiaojun, Chen Yonggui, et al. Spatialtemporal change of vegetation coverage in Shaanxi Province from 1998 to 2008[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(6): 674 – 678, 715. (in Chinese)

6 王强, 张勃, 戴声佩, 等. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1302 – 1308.
Wang Qiang, Zhang Bo, Dai Shengpei, et al. Analysis of the vegetation cover change and its relationship with factors in the Three-North Shelter Forest Program[J]. China Environmental Science, 2012, 32(7): 1302 – 1308. (in Chinese)

7 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[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255 – 1268.
Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255 – 1268. (in Chinese)

8 吴昌广, 周志翔, 肖文发, 等. 基于 MODIS NDVI 的三峡库区植被覆盖度动态监测[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 22 – 28.
Wu Changguang, Zhou Zhixiang, Xiao Wenfa, et al. Dynamic monitoring of vegetation coverage in three gorges reservoir area based on MODIS NDVI[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(1): 22 – 28. (in Chinese)

9 Xiao J F, Moody A. A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(2 – 3): 237 – 250.

10 Voorde T V D, Vlaeminck J, Canters F. Comparing different approaches for mapping urban vegetation cover from Landsat ETM + data: a case study on Brussels[J]. Sensors, 2008, 8(6): 3880 – 3902.

11 Jiapaer G, Chen X, Bao A. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1698 – 1710.

12 徐涵秋, 何慧, 黄绍霖. 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 2954 – 2963.
Xu Hanqiu, He Hui, Huang Shaolin. Analysis of fractional vegetation cover change and its impact on thermal environment in the Hetian Basinal Area of County Changting, Fujian Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 2954 – 2963. (in Chinese)

13 孙刚, 万华伟, 王昌佐, 等. 蒙陕甘宁能源金三角植被覆盖遥感监测与动态分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 247 – 250.
Sun Gang, Wan Huawei, Wang Changzuo, et al. Vegetation monitoring and analyzing of golden triangle energy in inner Mongolia, Shaanxi, Gansu and Ningxia Region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 247 – 250. (in Chinese)

14 高国林, 王石英, 蒋容. 翠屏区植被覆盖及其景观格局变化遥感分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 104 – 109.
Gao Guolin, Wang Shiyong, Jiang Rong. Remote sensing analysis on vegetation cover and landscape patterns change in Cuiping [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 104 – 109. (in Chinese)

15 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]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 207 – 215.
Hu Yufu, Jiang Shuanglong, Liu Yu, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage on upper Anning river based on RS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 207 – 215. (in Chinese)

16 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.
Zhang Can, Xu Hanqiu, Zhang Hao, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of southeastern China: Changting County, Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 917 – 928. (in Chinese)

17 Small C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(7): 1305 – 1334.

18 Jianga Z, Hueteb A R, Chena J, et al. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(3): 366 – 376.

19 江洪, 毛政元, 汪小钦. 地形调节植被指数及其在森林动态监测中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 8 – 12.
Jiang Hong, Mao Zhengyuan, Wang Xiaoqin. A topography-adjusted vegetation index (TAVI) and its application in dynamic forest monitoring[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(5): 8 – 12. (in Chinese)

20 江洪, 汪小钦, 吴波, 等. 地形调节植被指数构建及在植被覆盖度遥感监测中的应用[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 527 – 532.
Jiang Hong, Wang Xiaoqin, Wu Bo, et al. A topography-adjusted vegetation index (TAVI) and its application in vegetation fraction monitoring[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2010, 38(4): 527 – 532. (in Chinese)

21 Jiang H, Wu B, Wang X. Developing a novel topography-adjusted vegetation index (TAVI) for rugged area[C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010: 2075 – 2078.

22 肖能文, 江洪, 汪小钦, 等. 地形调节植被指数的抗地形效果验证[J]. 遥感信息, 2013, 28(4): 75 – 80.
Xiao Nengwen, Jiang Hong, Wang Xiaoqin, et al. Verification of topographic elimination performance for topography-adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(4): 75 – 80. (in Chinese)

23 刘亚迪, 汪小钦, 江洪. 基于地形调节植被指数 TAVI 的长汀县植被覆盖度估算[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 164 – 171.
Liu Yadi, Wang Xiaoqin, Jiang Hong. Estimation of vegetation coverage based on topography-adjusted vegetation index (TAVI) in Changting County, Fujian Province[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(1): 164 – 171. (in Chinese)

24 江洪, 王钦敏, 汪小钦. 福建省长汀县植被覆盖度遥感动态监测研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 126 – 132, 166.
Jiang Hong, Wang Qinmin, Wang Xiaoqin. Dynamic monitoring of vegetation fraction by remote sensing in Changting County of Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 126 – 132, 166. (in Chinese)

25 Ichoku C, Karnieli A. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation[J]. Remote Sensing Reviews, 1996, 13(3): 161 – 186.