

土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年 土壤侵蚀变化的定量影响

陈 森¹, 汪小钦¹, 林敬兰², 岳 辉³, 周伟东⁴, 江 洪¹

(1.福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心,数字中国研究院(福建),福州 350108;2.福建省水土保持试验站,福州 350001;
3.福建省长汀县水土保持中心,福建 长汀 366300;4.福建省数字经济发展促进中心,福州 350003)

摘要:土地利用和植被覆盖是人类活动对大自然改造的直接体现,为研究人类活动对土壤侵蚀的定量影响,以中国南方红壤典型水土流失区——福建省长汀县为研究区,利用每间隔 3~4 年的 11 个年份的遥感影像,基于 USLE 模型评估该县 1988—2020 年 30 多年来的土壤侵蚀时空变化特征,定量分析不同土地利用和植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)变化对土壤侵蚀的影响。结果表明:(1)长汀县土壤侵蚀严重区域主要集中于县域中部河田镇、三洲镇和策武镇等地,30 多年来,土壤侵蚀强度呈先增后减的趋势,1988—1994 年土壤侵蚀状况逐渐严重,1994 年的水土流失率高达 30.49%,90 年代中期后开始逐渐好转,至 2020 年水土流失率降为 6.22%。(2)1988—1994 年和 1994—2001 年 2 个时期,林地转化成裸地的面积最大,导致土壤侵蚀增加量平均约占每个时期增加量的 93%;2001—2010 年和 2010—2020 年 2 个时期,裸地转化成林地的面积最大,引起的土壤侵蚀减少量平均约占每个时期减少量的 73%。(3)30 多年来长汀县 FVC 呈先减少后增加的趋势,1988—1994 年平均 FVC 从 44%减少到 35%,随后开始增加,至 2020 年,FVC 增加至 79%;土壤侵蚀量与 FVC 呈反比,FVC 减少对土壤侵蚀量的影响更大,FVC 平均每降低 1%,土壤侵蚀量增加 7.49 万 t;而 FVC 平均每增加 1%,土壤侵蚀量减少 3.75 万 t。(4)FVC 对土壤侵蚀的敏感性与坡度呈正比,低坡度下土壤侵蚀随 FVC 变化较均匀,高坡度等级下,FVC 低于 60%时,对土壤侵蚀的敏感性高,FVC 每增加 10%,土壤侵蚀模数平均减少 262.73 t/(km²·a)。研究结果有助于分析长汀县土壤侵蚀在长时间序列上的时空变化及人类活动对土壤侵蚀的影响,为长汀县未来的土地利用规划和生态保护提供重要的科学支持。

关键词:长汀县;土壤侵蚀;时空分析;土地利用变化;植被覆盖变化

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)05-0168-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.021

Quantitative Effects of Land Use and Vegetation Cover Changes on Soil Erosion in Changting County in Recent 30 Years

CHEN Miao¹, WANG Xiaoqin¹, LIN Jinglan², YUE Hui³, ZHOU Weidong⁴, JIANG Hong¹

(1.Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing, Fuzhou University, National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou 350108; 2.Soil Conservation Experimental Station of Fujian Province, Fuzhou 350001; 3. Soil and Water Conservation Station of Changting County, Changting, Fujian 366300; 4.Digital Economy Development Promotion Center of Fujian Province, Fuzhou 350003)

Abstract: Land use and vegetation cover are direct manifestations of human activities in transforming nature. In order to quantitatively assess the impact of human activities on soil erosion, this study focuses on Changting County, a typical red soil erosion-prone area in southern China. Using remote sensing images from 11 years between 1988 and 2020 with 3- or 4-years interval, the USLE model was applied to evaluate the spatiotemporal characteristics of soil erosion in the county over the past 30 years, and the quantitative impact of different land use and Fractional Vegetation Cover (FVC) changes on soil erosion was analyzed. The

收稿日期:2023-02-27

资助项目:福建省高校产学研重点项目(2017Y4010);福建省水利科技项目(MSK202301,MSK202214)

第一作者:陈森(1998—),男,江西瑞金人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: 1249343573@qq.com

通信作者:汪小钦(1972—),女,福建古田人,博士,研究员,主要从事资源环境遥感研究。E-mail: wangxq@fzu.edu.cn

results showed that: (1) The severe soil erosion in Changting County is mainly concentrated in the central areas of the county, including Hetian Town, Sanzhou Township, and Cewu Township. Over the past 30 years, the intensity of soil erosion showed an increasing trend followed by a decreasing trend. From 1988 to 1994, the situation of soil erosion became increasingly severe, with a soil erosion rate as high as 30.49% in 1994. Since the mid-1990s, the situation gradually improved, and by 2020, the soil erosion rate had decreased to 6.22%. (2) During the two periods of 1988—1994 and 1994—2001, the area of forest land converted to bare land was the largest, resulting in an average increase in soil erosion of about 93% for each period. During the two periods of 2001—2010 and 2010—2020, the area of bare land converted to forest land was the largest, resulting in an average reduction in soil erosion of about 73% for each period. (3) For over 30 years, the FVC in Changting County has shown a decreasing trend followed by an increasing trend. The average FVC decreased from 44% to 35% between 1988 and 1994, after which it began to increase. As of 2020, the FVC has increased to 79%. The soil erosion amount was inversely proportional to the FVC, and the impact of FVC reduction on soil erosion was greater. On average, for every 1% decrease in FVC, the soil erosion increased by 74 900 tons, while for every 1% increase in FVC, the soil erosion decreased by 37 500 tons. (4) The FVC in Changting County was negatively correlated with soil erosion intensity, and the sensitivity to soil erosion was positively correlated with slope. Under low slope conditions, soil erosion changed more uniformly with FVC, but under high slope conditions, when FVC was less than 60%, the sensitivity to soil erosion was high. For each 10% increase in FVC, the average soil erosion modulus in areas with a slope greater than 15° was reduced by 262.73 t/(km² · a). This study helps to analyze the spatiotemporal changes of soil erosion in Changting County over a long time series and the impact of human activities on soil erosion, providing important scientific support for future land use planning and ecological protection in Changting County.

Keywords: Changting County; soil erosion; spatiotemporal analysis; land use change; vegetation cover change

土壤侵蚀破坏地表土壤结构,降低土地生产力,威胁粮食安全,是限制当今人类生存与发展的全球性环境灾害^[1-2]。土壤侵蚀的形成包括多方面原因,降雨量的增加^[3]、土地利用的改变^[4]和植被覆盖度低^[5]等都是造成土壤侵蚀的重要因素。中国是受土壤侵蚀影响最严重的国家之一,其中南方红壤丘陵区土壤侵蚀因其具有隐蔽性强和不易治理^[6-7]等特点,严重危害到该区域的社会经济发展和生态安全。因此,及时有效地对土壤侵蚀进行定量监测和分析显得尤为迫切与重要。

土地利用和植被覆盖的改变对土壤侵蚀具有重要的影响。Seutloali等^[8]研究发现,土地利用变化是发展中国家土壤侵蚀的主要原因;张洋等^[9]对黄河上游西柳沟流域土壤侵蚀研究发现,草地转化为林地或耕地是土壤侵蚀程度降低的主要土地利用变化类型。土地利用变化不仅影响局部地区的气候和地形,更影响该地区的植被覆盖,而植被覆盖与土壤侵蚀具有较大相关性^[10]。Wang等^[11]研究发现,植被覆盖是土壤侵蚀的最大影响因素之一;Teng等^[12]研究发现,随着植被覆盖的增加,土壤侵蚀明显减少。

长汀县曾经是南方红壤丘陵区中土壤侵蚀最严重

的县域之一,土壤侵蚀严重制约该区域的经济的发展,破坏耕地资源,影响水质状况,危害当地的生态系统^[13-14]。从20世纪80年代开始,国家和福建省政府颁布一系列措施,从小流域示范治理到大规模治理,不断改善长汀县的土壤侵蚀状况,长汀县水土流失治理案例在2021年入选联合国《生物多样性公约》的生态修复典型案例,长汀经验被推向世界。围绕着长汀的土壤侵蚀问题,许多学者对其开展大量的研究,如有学者^[15-16]探究长汀土壤侵蚀与生态之间的关系发现,在土壤侵蚀严重区域,生态服务价值偏低,生态脆弱性程度较高;还有学者^[17]在探究长汀土壤侵蚀与森林碳汇之间的关系时发现,在遭受土壤侵蚀的区域,森林的碳汇功能较弱。尽管一些学者^[18]针对长汀的植被覆盖变化或不同土地利用下的土壤侵蚀^[19]进行过研究,但在植被覆盖和土地利用的变化对土壤侵蚀影响的定量分析方面却不多。而植被覆盖和土地利用的改变是影响土壤侵蚀的关键因素,因此定量分析植被覆盖和土地利用的变化对土壤侵蚀的影响对分析长汀县土壤侵蚀的治理历程具有重要意义。

本文以长汀县为研究区,借助通用土壤流失方程USLE(universal soil loss equation)^[20-21]对该县1988—

2020 年 30 多年的土壤侵蚀状况进行动态监测及时空分析,并从土地利用和植被覆盖变化等角度对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化进行较深入和全面的定量分析,为该区域提出科学水土保持政策提供合理依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长汀县(25°18′40″—26°02′05″N, 116°00′45″—116°39′20″E)位于福建省龙岩市西北部,地处武夷山脉南端,南面与广东相邻,西面与江西相接(图 1),该县总面积约 3 100 km²,包含 18 个乡镇,水土流失较严重的为中部的河田镇、策武镇和三洲镇。地形以丘陵为主,汀江纵贯县境,平均海拔约 518 m,平均坡度约为 12°。依据水利部颁发的《水利水电工程水土保持技术规范》标准^[22],将长汀县坡度分为 0~5°,5°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°, >35° 6 个等级,各坡度等级面积占比分别为 5.93%, 10.38%, 30.43%, 35.94%, 14.60% 和 2.72%。面积占比最大的坡度等级为 15°~25°,其次为 8°~15°,两者面积占比超过总面积的 65%, <5° 和 >35° 区域面积较小,占比均小于 6.00%。该县多年平均气温 18.3 °C,平均降水量为 1 700 mm,属亚热带湿润季风气候;土壤类型以红壤为主,有机质含量较少,植物生长困难,易受侵蚀。县域内植被以马尾松为主^[23],林分结构单一,土壤表面裸露程度高,使得林下水土流失严重。



图 1 研究区地理位置与坡度分布

长汀县水土流失问题历史悠久,虽从 20 世纪 80 年代起,水利部将和田镇设立为南方小流域治理示范区,但由于政策落实不到位,民众治理意识薄弱,土壤侵蚀现象不减反增。20 世纪 90 年代末,在政府的不

断治理下,长汀县土壤侵蚀现象得以遏制,情况逐渐好转。进入 21 世纪后,福建省政府把长汀县水土流失治理列为为民办实事项目,每年拨款 1 000 万用于水土流失治理,土壤侵蚀现象得到较大改善。

1.2 数据来源

本文使用的数据包括:(1)长汀县 1988 年、1991 年、1994 年、1998 年、2001 年、2003 年、2007 年、2010 年和 2013 年的土壤侵蚀数据、植被覆盖度和土地利用数据等^[24];(2)2017 年 10 月份和 2020 年 10 月份的 Landsat8 OLI 数据,用于土地利用分类、植被覆盖度估算和 C 因子计算;(3)降雨数据从国家气象局公布的站点获取,再利用克里金插值法生成栅格图,用于计算 R 因子;(4)地形数据为 ASTER GDEM 的 30 m 空间分辨率 DEM 数据,用于计算 LS 因子和坡度;(5)土壤类型数据为国家地球系统科学数据中心的福建省 1:100 万土壤类型图,用于计算 K 因子。

1.3 研究方法

采用通用土壤流失方程(USLE)^[20-21]计算长汀县的土壤侵蚀模数。其数学表达式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

式中:A 为土壤侵蚀模数,表示年每平方公里的平均土壤流失量[t/(km²·a)];R 为年降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(km²·h·a)];K 为土壤可蚀性因子[(t·h)/(MJ·mm)];L 和 S 为坡长和坡度因子,无量纲;C 为植被覆盖度因子,无量纲;P 为水土保持措施因子,无量纲。各因子具体计算方法参考周伟东等^[24]的研究论文。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀的时空变化

2.1.1 土壤侵蚀强度的时空变化 利用 USLE 模型计算长汀县 1988—2020 年共 11 个年份的土壤侵蚀模数,并根据水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[25]将土壤侵蚀强度划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈 6 个侵蚀等级(图 2)。

由图 2 可知,从 1988—2020 年,土壤侵蚀强度主要表现为轻度侵蚀,遍布于全县各区域,中度及以上侵蚀主要分布于植被覆盖低及坡度较陡区域,整体呈“先增后减”的趋势。1988—1994 年间,土壤侵蚀逐渐加重,1988 年土壤侵蚀面积约为 681.07 km²,至 20 世纪 90 年代中期土壤侵蚀面积达 976.19 km²,其中中度侵蚀及以上面积约有 162.13 km²,约占侵蚀面积的 16.60%。侵蚀现象主要发生在中部河田镇、三洲镇、策武镇附近,这些地区由于被丘陵山脉环绕,且处于河谷盆地,降雨充足,因此土壤侵蚀现象格外严重。1994—2001 年间,土壤侵蚀现象开始好转,2001

年土壤侵蚀面积为 641.39 km²,侵蚀整体呈现减轻趋势,中部区域的改善效果明显,这期间土壤侵蚀治理措施逐渐完善,之前的治理成果逐渐见效,但土壤侵蚀面积占总面积的比例仍超过 20.00%。2001—2010 年间,土壤侵蚀现象持续减少,至 2010 年,土壤侵蚀面积为 352.16 km²,除中部区域外,其余地区侵蚀现象

整体处于较低水平,这与 2000 年后福建将长汀水土流失治理列为全省为民办实事项目之一密切相关。2010—2020 年间,中部区域土壤侵蚀现象减少明显,其余区域由于土壤侵蚀已处于较低水平,改变不大,土壤侵蚀现象较少再大片出现,且主要发生于土地扰动区域,2020 年土壤侵蚀面积下降为 192.82 km²。

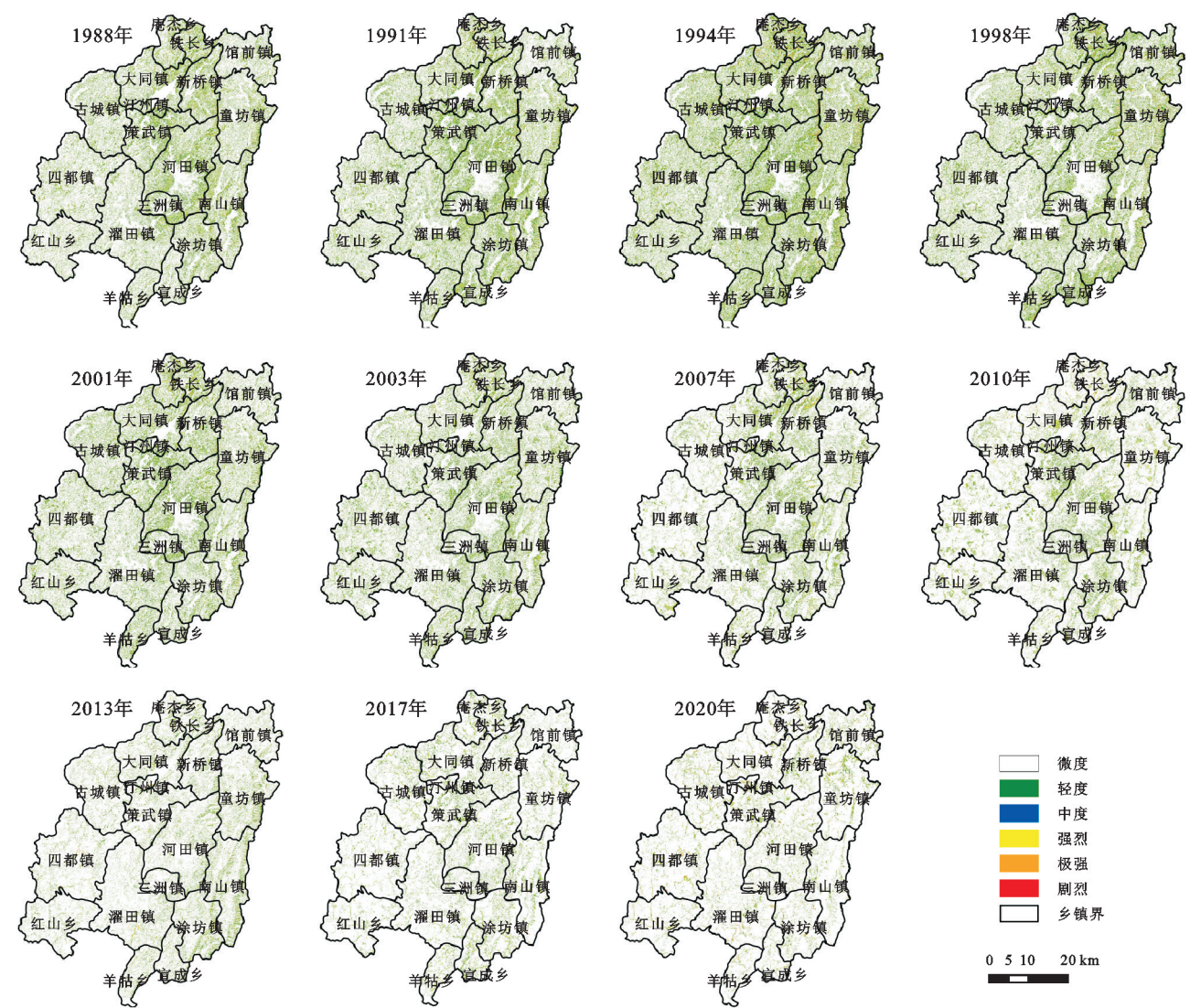


图 2 1988—2020 年长汀县土壤侵蚀强度分布

为更好地分析土壤侵蚀强度的变化情况,根据土壤侵蚀强度的动态变化绘制土壤侵蚀强度变化图(图 3)。从图 3 可以看出,1988—2020 年轻度侵蚀的面积占全县土地面积的比例最多。其中,1994 年轻度侵蚀占比最多,为 25.26%;2020 年轻度侵蚀占比最少,为 4.49%。其次占比最多的为中度侵蚀,而强烈及以上程度侵蚀占比较少。1988—1994 年期间,各强度土壤侵蚀面积均表现出增加的趋势,表明土壤侵蚀状况逐渐严重。而 1994—2020 年期间,轻度侵蚀占比呈现逐渐减小的趋势,中度侵蚀占比呈波浪式减小,而强烈以上侵蚀则呈现小幅波动。同时,从图 3 可以看出,1988—2020 年间长汀县土壤侵蚀轻度及以上侵蚀面积减少 15.75%。

从侵蚀的增减趋势来看,在 1988—1994 年土壤侵蚀增加期间,轻度侵蚀向其他各类侵蚀转变的面积小于其他各类侵蚀向轻度侵蚀转变的面积,接近 1/2 的侵蚀面积是从微度侵蚀转化而来。其中变化最大的时间段为 1991—1994 年,轻度侵蚀面积占比增加 3.97%。这些结果进一步表明,1988—1994 年土壤侵蚀情况恶化。而在 1994 年后,土壤侵蚀治理效果逐渐得到体现,轻度及以上侵蚀面积占比减小,至 2020 年共减少 20.77%。土壤侵蚀状况改善最明显的时间段为 1998—2001 年,这期间轻度及以上侵蚀面积占比减少 6.35%。在 2010 年后,轻度侵蚀面积向微度侵蚀面积转化的比例进一步增大,而下一年份的轻度侵蚀面积大部分是由上一年份的微度侵蚀转

换而来。这表明,虽然长汀县水土流失区域的治理有一定成效,但没注意巩固已有水土流失治理成果,使得原本侵蚀较少或无侵蚀区域转为轻度侵蚀区域或

其他程度侵蚀区域。值得注意的是,1988—2020 年间,强烈及强烈以上的侵蚀区域面积虽呈现小幅波动变化,但面积占比都保持在 2% 以下。

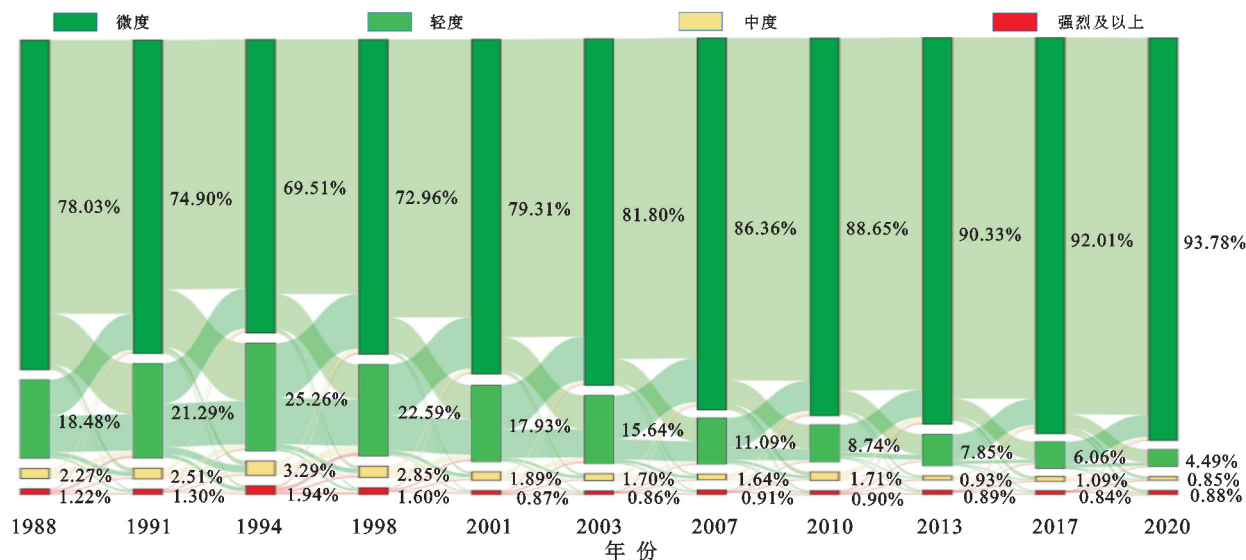


图 3 1988—2020 土壤侵蚀强度等级面积比例及变化

2.1.2 水土流失率的时空变化 水土流失率^[26]从一定程度上反映一个地区的土壤侵蚀状况,它的计算为轻度及以上土壤侵蚀面积占总面积的百分比。从图 3 可以看出,长汀县 30 余年的水土流失率变化状况。1988—2020 年,长汀县水土流失率呈现先升后降的趋势,2001 年前,水土流失率均超过 20%,其中 90 年代中期最高,水土流失率高达 30.49%。近 20 年逐渐降低,水土流失率从 2001 年的 20.69%,降到 2010 年的 11.36%,至 2020 年降为 6.22%。

为更直观研究长汀县近 30 年来土壤侵蚀的空间分布状况,计算各年份各乡镇的水土流失率(图 4)。总体来看,各乡镇水土流失率呈现先增后减的趋势。在 1988—1994 年间,长汀县各乡镇水土流失率均呈现增加趋势,在 1994 年达到峰值,共有 16 个乡镇水土流失率在 25% 以上,分布于长汀中部、东部、北部和南部。1994 年之后,西部几个乡镇水土流失率先降低,西部乡镇(如四都镇)为长汀县重点林区,植被覆盖相对较好,侵蚀程度也较轻。到 2003 年,各乡镇水土流失率均降低至 25% 以下。到 2013 年,各乡镇水土流失率均降低至 15% 以下,西部各乡镇更是降低至 10% 以下。而到 2020 年,各乡镇水土流失率均降低至 10% 以下,而同年福建省水土流失率为 7.52%,长汀县水土流失率已低于福建省水土流失率。

局部来看,中部区域尤其是河田镇一直是长汀县水土流失最严重的乡镇之一,特别是在 2001 年之前河田镇的水土流失率均大于 25%。2001 年后,河田镇水土流失率逐渐下降,至 2020 年,已降至 10% 以下。而西部乡镇如红山乡和四都镇等在 1988—1994 年期间水土流失率增加约 10%,1994 年后逐步下降,

至 2020 年水土流失率已低于 5%。

2.2 土地利用变化对土壤侵蚀的影响

2.2.1 不同时期土地利用变化面积分析 本文的土地利用变化只考虑林地向裸地和耕地的变化、裸地向林地和耕地的变化以及耕地向林地和裸地的变化。对 1988—2020 年的土地利用变化状况分为 4 个时期进行统计(图 5a),其中 2001—2010 年期间土地利用变化面积最多,约占全县总面积的 16.81%,其他 3 个时期土地利用变化的总面积皆超过全县总面积的 10.00%。

不同时期,不同土地利用变化类型有明显的差异。1988—1994 年林地转裸地的面积最多,占同时期总变化面积的 72.55%,远超其他土地变化类型。1994—2001 年,裸地转林地的面积急剧增加,几乎接近林地转裸地的面积,占同时期总变化面积的 34.55%。2001—2010 年,裸地转林地的面积超过林地转裸地面积,占同时期总变化面积的 35.31%,裸地转林地成为土地利用面积变化最大的类型,其次为裸地转耕地类型。2010—2020 年,裸地转林地面积依旧最大,占同时期总变化面积的 34.66%,耕地转林地超越裸地转耕地成为第 2 大土地利用变化类型,而林地转裸地的面积处于相对较低水平,林地转耕地面积超过林地转裸地成为土壤侵蚀增加类型中变化面积最大的类型。

30 多年来,林地转裸地的面积呈现递减的趋势,林地转耕地表现出递增的趋势,耕地转裸地、裸地转林地和裸地转耕地呈现先增后减的趋势,而耕地转林地则呈现先减后增的趋势。

2.2.2 不同土地利用变化对土壤侵蚀量的影响分析 根据 1988—2020 年不同土地利用变化情况分析其对土壤侵蚀量的影响(图 5b)。总体来看,裸地转林地

和林地转裸地分别是侵蚀量减少和增加最大的土地利用变化类型,平均每个时期分别减少和增加约 6.1 万 t 和 6.8 万 t,侵蚀量增减最少的土地利用变化类型则不唯一。裸地转林地或耕地和耕地转裸地变化

类型减少和增加的侵蚀量呈先增后减的趋势,林地转耕地增加的侵蚀量呈先减后增的趋势,耕地转林地减少的侵蚀量呈递增的趋势,而林地转裸地增加的侵蚀量则呈现波浪式下降的趋势。

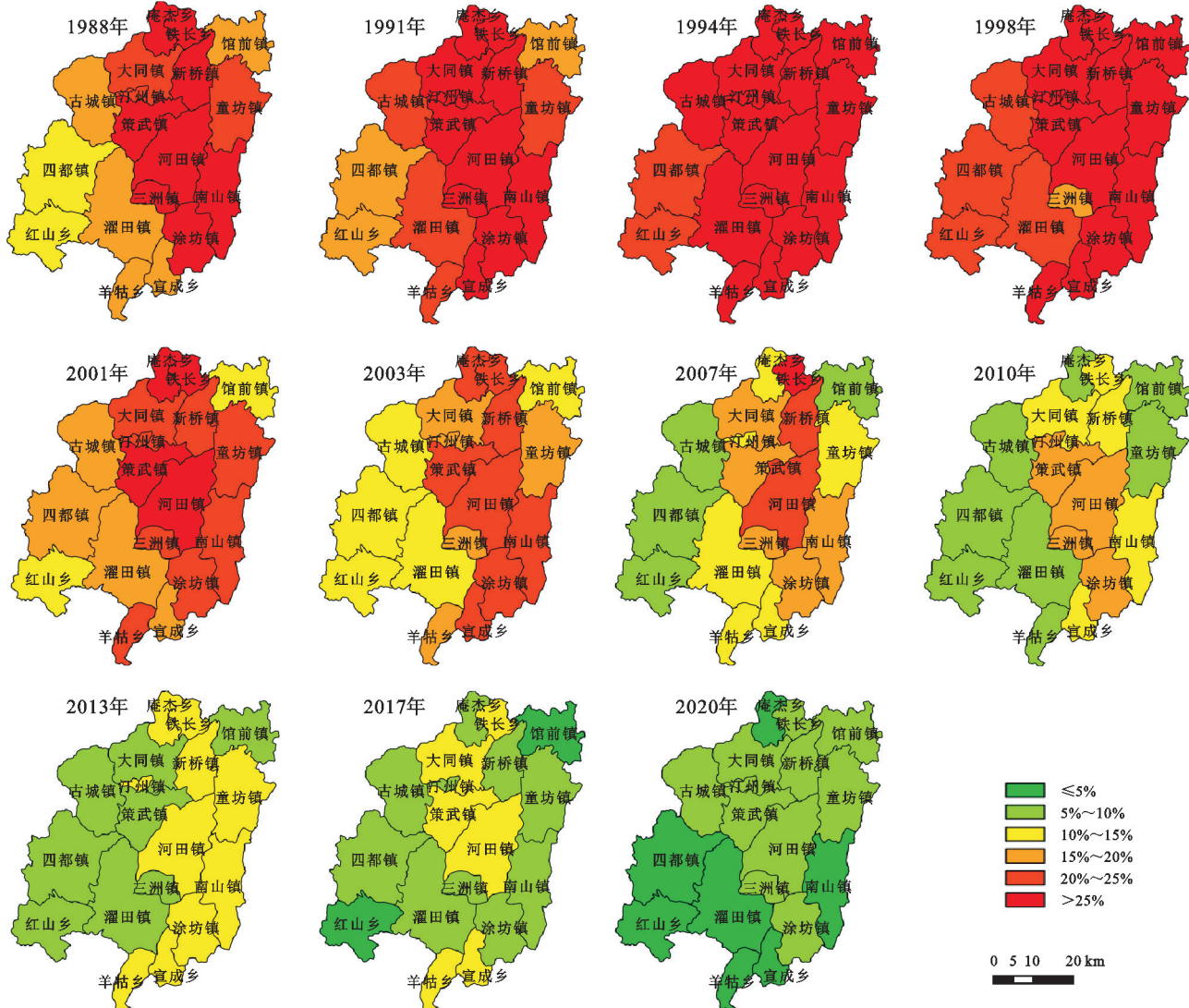


图 4 1988—2020 各乡镇水土流失率状况

从每个时间段来看,1988—1994 年土壤侵蚀状况恶化明显。耕地转林地、裸地转耕地和裸地转林地的土壤侵蚀减少量分别为-205.8,2 318.03,22 042.6 t,耕地转裸地、林地转耕地和林地转裸地的土壤侵蚀增加量分别为 5 473.44,609.12,137 499.85 t。这段时期林地转裸地的面积远超其他变化类别,且林地向裸地转化使变化区域土壤侵蚀模数增加 515 t/(km²·a),土壤侵蚀的增加量也最大;而耕地转林地的土壤侵蚀量出现小幅增长,这是由于 1994 年土壤侵蚀较严重,使得这段时期耕地转林地变化区域的土壤侵蚀量增加 15 t/(km²·a),因此土壤侵蚀量增加。

1994—2001 年土壤侵蚀状况改善明显。耕地转林地、裸地转耕地和裸地转林地的土壤侵蚀减少量分别为 2 271.47,19 802.25,40 017.42 t,耕地转裸地、

林地转耕地和林地转裸地的土壤侵蚀增加量分别为 7 641.62,-1 609.5,56 311.96 t。土壤侵蚀减少量较上一时期增幅较大而土壤侵蚀增加量相对减少,特别是林地转裸地的增加量约为上一时期的 41.00%,与该时期林地转裸地的面积减小约 1/2 有关;而裸地向林地转化使变化区域土壤侵蚀模数减少 342 t/(km²·a)和裸地转林地面积的增加,使裸地转林地引起的土壤侵蚀减少量约为上一时期的 1.82 倍。

2001—2010 年,土壤侵蚀状况进一步改善。耕地转林地、裸地转耕地和裸地转林地的土壤侵蚀减少量分别为 6 377.28,38 500.11,110 383.26 t,耕地转裸地、林地转耕地和林地转裸地的土壤侵蚀增加量分别为 10 029.36,6 022.5,63 201.84 t。其间裸地向林地转化使变化区域土壤侵蚀模数减少 611 t/(km²·a),裸地转林地面积也有所增加,使减少量迅

速增加,约为上一时期的 2.76 倍;而林地向耕地转化使变化区域土壤侵蚀模数增加 $146 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,加上林地转耕地的面积增加较多,使林地转耕地的土壤侵蚀量增加较多。

2010—2020 年土壤侵蚀状况持续改善。耕地转林地、裸地转耕地和裸地转林地的土壤侵蚀减少量分别为 $17\,976.14, 5\,116.7, 72\,426.06 \text{ t}$,耕地转裸地、林地转耕地和林地转裸地的土壤侵蚀增加量分别为

$4\,432.7, 12\,081.48, 15\,164.55 \text{ t}$ 。裸地转林地和林地转裸地的侵蚀量减少和增加量皆大幅减少。此外,裸地转耕地侵蚀减少量减幅也较大,主要与裸地转耕地面积减少较多有关。耕地转林地侵蚀减少量超过裸地转耕地成为仅次于裸地转林地的侵蚀量减少类型,土壤侵蚀模数减少 $166 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,而林地转耕地超过耕地转裸地成为仅次于林地转裸地的侵蚀量增加类型,土壤侵蚀模数增加 $148 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

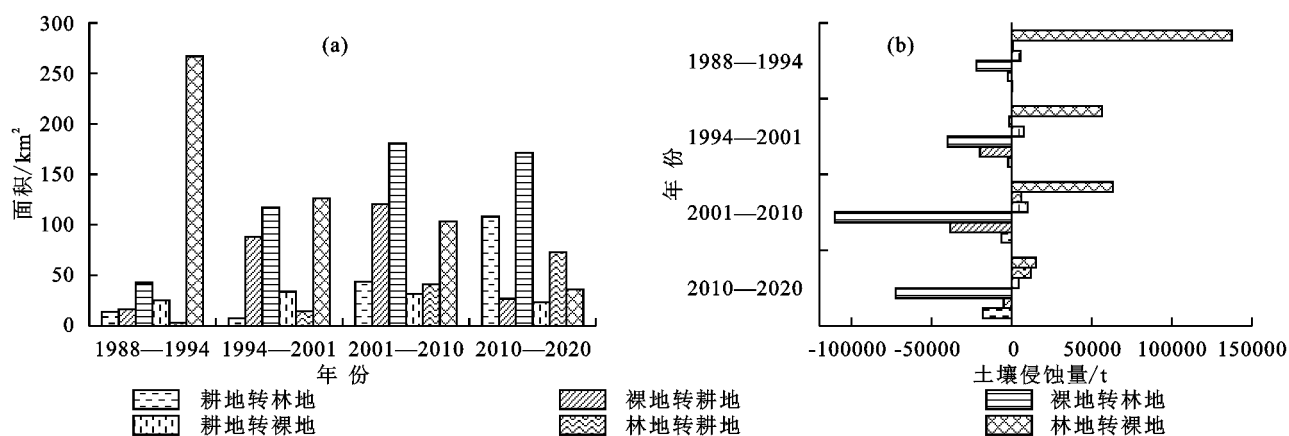


图 5 土地利用变化面积情况及对土壤侵蚀量的影响

2.3 植被覆盖变化对土壤侵蚀的影响

2.3.1 长汀县 1988—2020 年植被覆盖变化 利用像元二分模型^[27]计算长汀县 1988—2020 年 FVC(图 6),并绘制各年份 FVC 箱线图(图 7),分析该地区 FVC 变化。空间分布上中部区域 FVC 较四周更低,至 20 世纪初,县域中心位置 FVC 长期处于较低水平($\text{FVC} < 30\%$),而县域四周尤其是西部地区,FVC 普遍比其他区域高,且 FVC 变化程度较中部变化更小。长汀县 FVC 整体上呈现先减后增的趋势。1994 年前 FVC 逐渐降低,FVC 值集中分布于 $30\% \sim 60\%$,到 1994 年 FVC 均值仅为 35% 。之后 FVC 开始逐渐升高,1998 年箱体高度较高,FVC 值分布跨度较大,位于 $30\% \sim 70\%$ 。1998 年后箱体高度呈减小趋势,至 2020 年 FVC 值集中分布于 $70\% \sim 90\%$ 。

2.3.2 植被覆盖变化对土壤侵蚀的影响 计算长汀县 1988—2020 年 11 个年份的 FVC 均值及水土流失率和土壤侵蚀总量(图 8)。从图 8 可以看出,长汀县 1988—2020 年间 FVC 变化对土壤侵蚀变化有明显影响,FVC 与水土流失率和土壤侵蚀量呈显著的负相关关系。总体来看,FVC 的增减趋势与水土流失率和土壤侵蚀量的增减趋势相反,水土流失率与土壤侵蚀量的增减状况一致。1988—1994 年,FVC 减少 9.00% ,水土流失率增加 8.52% ,土壤侵蚀量增加约 67.44 万 t ,FVC 平均每降低 1.00% ,土壤侵蚀量增加约 7.49 万 t ;1994—2001 年,FVC 增加 19.00% ,水土流失率减少 9.80% ,土壤侵蚀量减少约 84.43 万 t ,FVC 平均每增加 1.00% ,土壤侵蚀量减少约 4.44

万 t,FVC 的增加对土壤侵蚀的减少有重要影响;2001—2020 年,FVC 增加 25.00% ,水土流失率减少 14.47% ,土壤侵蚀量减少约 80.86 万 t ,FVC 平均每增加 1.00% ,土壤侵蚀量减少约 3.23 万 t ,减少效率低于上一时期。

2.3.3 不同坡度下植被覆盖变化对土壤侵蚀的影响 计算各坡度等级下各年份的平均 FVC 和平均土壤侵蚀模数,绘制散点图(图 9)并计算拟合方程(表 1)。可以看出,在不同坡度范围下,土壤侵蚀模数皆随 FVC 的增大而减少,且随着坡度的增加,FVC 对土壤侵蚀模数的敏感性增加,两者相关性也增加,在 15° 以上区域, $R^2 > 0.80$ 。

在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围下,FVC 对土壤侵蚀模数的敏感性较低。这是由于在该坡度等级下,各年份 FVC 普遍较低,林地面积约占总面积的 $1/2$,水体和城镇面积占比在所有坡度等级中最大,而水体和城镇不考虑土壤侵蚀,故 FVC 变化对土壤侵蚀模数较不敏感,拟合方程的 R^2 较低也表明,土壤侵蚀模数与 FVC 相关性较弱。在 $5^\circ \sim 8^\circ$ 时,除林地外其他地类占比高达 30% ,FVC 对土壤侵蚀模数的敏感性也并不高。在 $8^\circ \sim 15^\circ$ 时,林地面积约占总面积的 85% ,林地面积占比的提升,使 FVC 对土壤侵蚀模数的敏感性有所提高。在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 时,林地占比达到 95% ,FVC 对土壤侵蚀模数的敏感性达到较高水平。在 25° 以上时,林地占比达到 99% ,FVC 对土壤侵蚀模数的非常敏感。因此,对于坡度越大的区域,FVC 的增加对于土壤侵蚀模数的减少作用更为显著。

在 15°以下时,土壤侵蚀模数随 FVC 变化比较均匀,而当坡度>15°时,土壤侵蚀模数随 FVC 变化出现阶段性变化。当坡度为 15°~25°,25°~35°和>35°范围,在 FVC<60%时,FVC 每增加 10%,土壤侵蚀模数分别

降低 163.62,253.04,371.53 t/(km²·a),土壤侵蚀模数变化幅度较大,FVC 对土壤侵蚀模数的敏感性很高;在 FVC>60%时,土壤侵蚀模数随 FVC 的增加而变化的幅度很小,FVC 对土壤侵蚀模数不敏感。

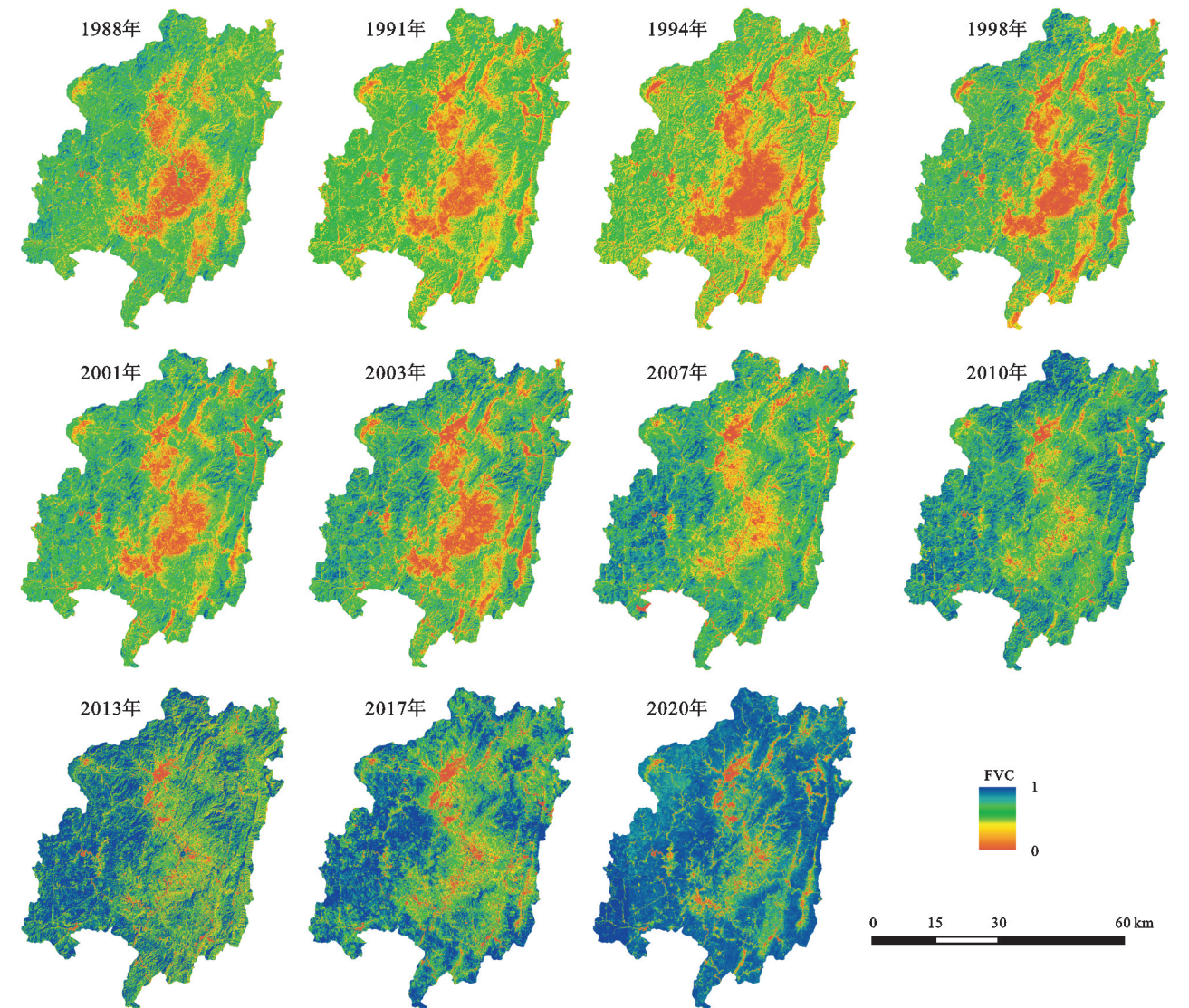
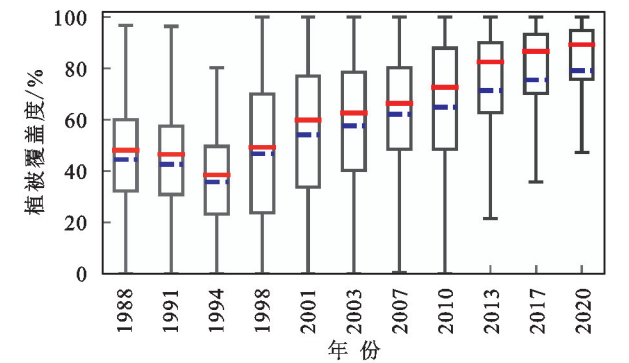


图 6 长汀县 1988—2020 年植被覆盖变化空间分布



注:图中红线为中位数,蓝线为平均值。

图 7 长汀县 1988—2020 年植被覆盖变化箱线图

3 讨论

人类活动容易引起土地利用的改变,而不同土地利用的水土保持能力不同,从而土地利用变化对土壤

侵蚀产生重要影响^[28]。现有研究^[29-30]多集中于不同土地利用类型的土壤侵蚀特征或定性研究土地利用变化对土壤侵蚀的影响,而较少从定量角度对土地利用变化对土壤侵蚀的影响进行分析。本文在 2.2 节定量分析了长汀县土地利用变化对土壤侵蚀的影响,结果表明,长汀县土壤侵蚀状况与土地利用变化密切相关。从图 5 可以看出,引起土壤侵蚀量增加的土地利用变化类型有林地转裸地、林地转耕地和耕地转裸地,而裸地转林地、耕地转林地和裸地转耕地则使土壤侵蚀量减少,这一结论在魏艳红等^[31]的研究中也有体现;土壤侵蚀对各土地利用变化的响应程度不一样,在土壤侵蚀增加量方面,林地转裸地的土壤侵蚀模数增加最大,其次是耕地转裸地,最小的为林地转耕地,而土壤侵蚀减少量方面,裸地转林地的土壤侵

蚀模数减小最大,其次是裸地转耕地,最小的为耕地转林地,该结果与汪水前^[19]的研究相符。根据其对于长汀县不同土地利用方式的土壤侵蚀量分析可得,相同条件下,裸地、耕地和林地侵蚀量大小排序为裸地>耕地>林地,侧面验证本研究结果的可靠性。由于土地利用变化对土壤侵蚀的影响,继续实施封山育林及小流域治理等水土保持措施,维持土壤侵蚀量的减少,同时加强对林地向裸地变化的管理,警惕林地向耕地的转化,遏制土壤侵蚀量的增加,对长汀县土壤侵蚀的治理具有重要意义。

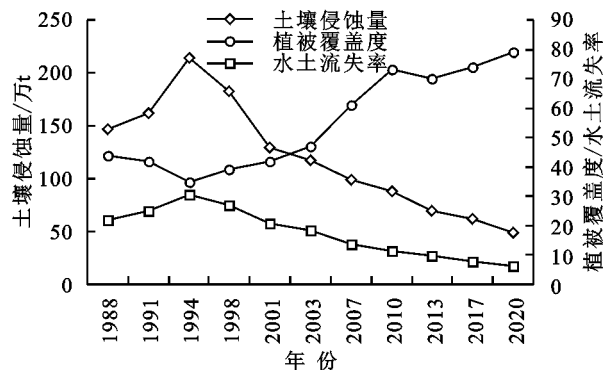


图8 植被覆盖度与土壤侵蚀量变化

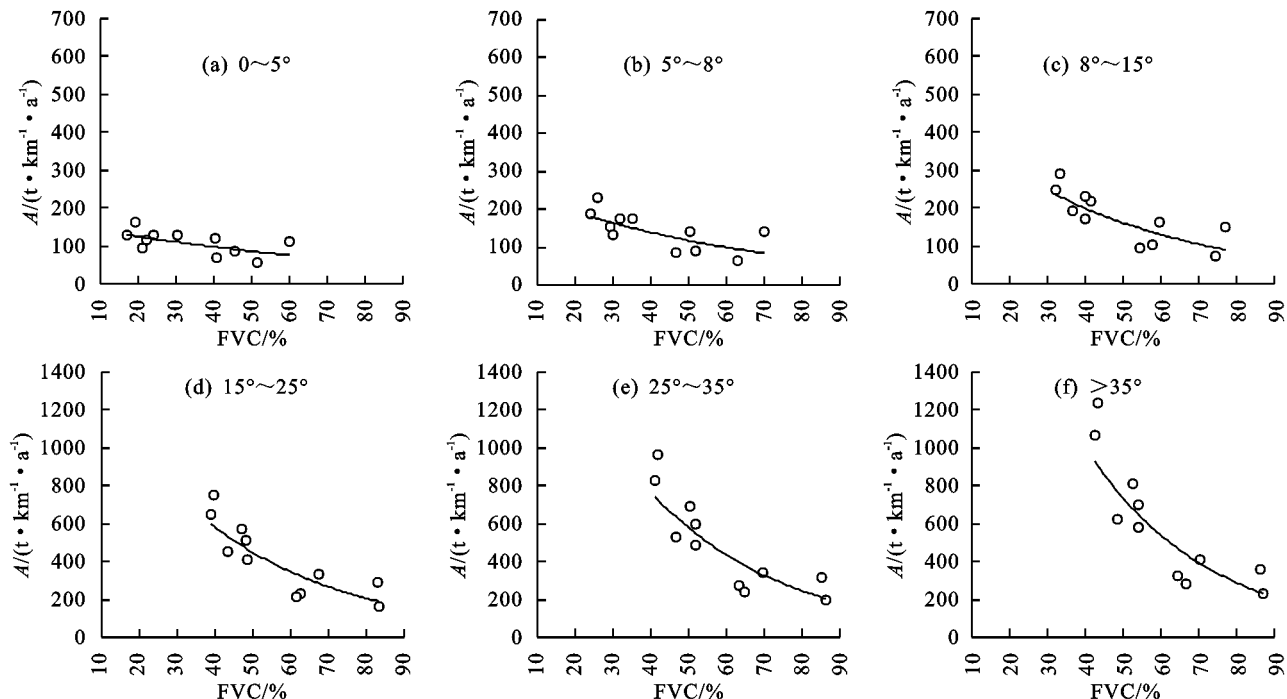


图9 不同坡度下土壤侵蚀模数(A)随FVC改变的变化

表1 长汀县各坡度等级下A(y)与FVC(x)拟合方程

| 坡度/(°) | 拟合公式 | R^2 |
|--------|--------------------|--------|
| 0~5 | $y=131.8x(-0.416)$ | 0.4048 |
| 5~8 | $y=136.4x(-0.755)$ | 0.5839 |
| 8~15 | $y=135.7x(-1.190)$ | 0.7407 |
| 15~25 | $y=133.6x(-1.726)$ | 0.8196 |
| 25~35 | $y=142.6x(-2.048)$ | 0.8490 |
| >35 | $y=149.9x(-2.371)$ | 0.8845 |

植被覆盖度是影响土壤侵蚀的主要因素^[32]。植被冠层可通过减缓雨滴的降落速度和雨滴冲击裸露土壤的能力,根系可以在土壤中形成稳定的土壤结构,增加土壤的稳定性,从而减少土壤侵蚀的发生^[33]。本文在2.3节定量分析了长汀县30多年来植被覆盖变化及与土壤侵蚀量变化的关系,结果表明,长汀县植被覆盖变化显著影响土壤侵蚀量的变化。在1988—1994年期间,政策不完善导致许多村民进山砍树,年均森林采伐超限,加上稀土矿的大规模开发,植被遭受严重破坏,土壤侵蚀量相应增加^[34-35];1994—2001年期间,长汀加大封山育林力度并改善

山林产权政策,加上之前种的速生林逐渐发育,植被覆盖度迅速增加,土壤侵蚀量减少较多^[36];2001—2020年间,福建省政府向长汀补助大量资金用于土壤侵蚀治理,由于前期对较好治理区域已采取措施,故后期植被覆盖土壤侵蚀量减小幅度相对变小。以往研究^[37-38]多关注于植被覆盖对土壤侵蚀的相关性,较少从植被覆盖对土壤侵蚀的敏感性方面进一步分析。本文2.3节不仅对植被覆盖变化对土壤侵蚀的影响进行研究,而且对不同坡度下植被覆盖对土壤侵蚀的敏感性进行分析,结果表明,植被覆盖对土壤侵蚀的敏感性随坡度增加而变大,但当植被覆盖度超过60%后对土壤侵蚀不再敏感。基于本文研究结果,增加15°以下植被覆盖度可能对长汀县土壤侵蚀的改善效果有限,此坡度下对土壤侵蚀的治理主要还是以巩固现有治理成果为主;而15°以上植被覆盖度变化对土壤侵蚀的敏感性较高,此时增加植被覆盖度可有效减少土壤侵蚀量,但也应注意是否达到阈值,以免降低治理效果。

4 结论

(1)长汀县土壤侵蚀强度以轻度为主,整体土壤侵蚀状况呈先增后减的趋势,1994年之前土壤侵蚀逐渐恶化,1994年后土壤侵蚀状况逐渐改善,土壤侵蚀区域主要发生在中部地区,和田、策武等乡镇侵蚀最严重,西南和东北部土壤侵蚀较少,1988—2020年间水土流失率共减少15.75%。

(2)1988—2020年土地利用变化对长汀县土壤侵蚀影响较大,不同时期对土壤侵蚀影响最大的土地利用变化类型不一样,2001年以前,林地转裸地的影响最大,平均每个时期对土壤侵蚀增加量贡献约93%,2001年后,裸地转林地的影响最大,平均每个时期对土壤侵蚀减少量贡献约73%。

(3)长汀县植被覆盖度空间分布呈中间低四周高的特征,1988—2020年间,植被覆盖度总体呈现先降低再增加的趋势,与土壤侵蚀量变化状况相反,土壤侵蚀量随植被覆盖度的增加而减小,相较于植被覆盖度的增加,植被覆盖度的降低对土壤侵蚀量的影响更加显著。

(4)不同坡度下植被覆盖度对土壤侵蚀模数的敏感性不同,坡度越大,FVC的变化对土壤侵蚀模数影响也越大,对于长汀坡度最大的2个区域范围,在 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时,FVC每增加10%,土壤侵蚀模数降低小于 $80\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,FVC对土壤侵蚀的敏感性略低, $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 时,FVC每增加10%,土壤侵蚀模数降低大于 $150\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,FVC对土壤侵蚀的敏感性较高。

参考文献:

- [1] Senanayake S, Pradhan B, Alamri A, et al. A new application of deep neural network (LSTM) and RUSLE models in soil erosion prediction[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 845: e157220.
- [2] Borrelli P, Panagos P, Alewell C, et al. Policy implications of multiple concurrent soil erosion processes in European farmland[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 103-112.
- [3] 曹裔, 高超, 张晓明, 等. 湖北省侵蚀性降雨时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 41-46, 53.
- [4] Xiao J Y, Xie B G, Zhou K C, et al. Assessment of soil erosion in the Dongting Lake Basin, China: Patterns, drivers, and implications[J]. *PLoS One*, 2021, 16(12): e0261842.
- [5] 王猛, 王鹤松, 姜超, 等. 基于RUSLE和地理探测器模型的西南地区土壤侵蚀格局及定量归因[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(6): 1386-1402.
- [6] 徐晓凤. 南方红壤侵蚀原因及对策[J]. *绿色科技*, 2017(2): 98, 100.
- [7] 分区五: 南方红壤区[J]. *中国水利*, 2009(7): 35-39.
- [8] Seutloali K E, Beckedahl H R. A review of road-related soil erosion: An assessment of causes, evaluation techniques and available control measures[J]. *Earth Sciences Research Journal*, 2015, 19(1): 73-80.
- [9] 张洋, 李鹏, 马文东, 等. 黄河上游西柳沟流域土壤侵蚀对土地利用变化响应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 70-76, 84.
- [10] Yifeng L, Xiaoqin W, Miaojin C. Sensitivity analysis of vegetation coverage to soil loss rate in red soil region of south China[C]// *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020, 502(1): e012040.
- [11] Wang W, Chen S M, Zhu L, et al. Research on the sensitivity assessment of soil erosion by AHP method: A case study in the Northeast of Ordos Basin[C]// *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020, 194: e04020.
- [12] Teng Y M, Zhan J Y, Liu W, et al. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 123: e107340.
- [13] 陈国光, 刘红樱, 陈进全, 等. 福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 26-35.
- [14] 黎恬, 崔煜婕, 黄锦璐, 等. 福建省长汀县水土流失区马尾松种群对干旱的响应与恢复[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 42-48, 55.
- [15] 王培俊, 刘旗, 孙煌, 等. 南方红壤水土流失区生态系统服务价值时空变化研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 219-228.
- [16] 陈樟昊, 姚雄, 余坤勇, 等. 南方典型红壤区生态脆弱性与土壤侵蚀的演化关系[J]. *西南林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(4): 82-90.
- [17] 师吉红, 项佳, 刘健, 等. 南方红壤典型水土流失区马尾松林地上林木碳储量的遥感监测: 以长汀县河田镇为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2151-2160.
- [18] 张仕山, 朱雄斌, 汪小钦. 基于年际Landsat系列数据的长汀县水土流失治理区植被恢复监测[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(4): 43-49.
- [19] 汪水前. 福建省长汀县不同土地利用方式下的坡地侵蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 84-88.
- [20] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[R]. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook: No. 537[M]. Washington: United States Department of Agriculture, 1978.
- [21] Helmi A M. Quantifying catchments sediment release in arid regions using GIS-based Universal soil loss equation (USLE)[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2023, 14(8): e102038.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL 575—2012 水利水电工程水土保持技术规范[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

- 态系统水土保持功能评估[J].水土保持学报,2020,34(3):84-90,97.
- [18] 吴志俊,王永强,鄢波,等.基于 InVEST 模型的鄂尔多斯市土壤侵蚀及土壤保持功能研究[J].水电能源科学,2021,39(8):31-34,98.
- [19] 张翔.黄河上游十大孔兑地区风水复合侵蚀产沙过程研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [20] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J].Geographical Analysis,2010,27(2):93-115.
- [21] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [22] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning with the universal soil loss equation[M].Washington D C: United States Department of Agriculture,1978.
- [23] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences,1990,329(1255):421-428.
- [24] 郑颖娟,刘军会,刘洋,等.2000—2018 年鄂尔多斯市植被覆盖度变化及驱动因素分析[J].环境科学研究,2022,35(11):2458-2468.
- [25] 管亚兵,杨胜天,周旭,等.黄河十大孔兑流域林草植被覆盖度的遥感估算及其动态研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(4):458-465.
- [26] Ren Z G, Tian Z H, Wei H T, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of vegetation in the Yellow River Basin, China during 2000—2020 [J]. Ecological Indicators,2022,138:e108832.
- [27] 滑永春,张恒,王冰,等.1982—2015 年内蒙古地区 NDVI 时空变化及驱动力分析[J].西南林业大学学报(自然科学版),2021,41(6):175-182.
- [28] Zhang Y R, He Y, Li Y L, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of NDVI from 1982 to 2015 in the Qinba Mountains, China[J].Environmental Science and Pollution Research,2022,29(34): 52277-52288.
- [29] He J Y, Jiang X H, Lei Y X, et al. Temporal and spatial variation and driving forces of soil erosion on the Loess Plateau before and after the Implementation of the Grain-for-Green Project: A case study in the Yanhe River Basin, China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(14):e8446.
- [30] 郭建英,董智,李锦荣,等.放牧强度对荒漠草原土壤物理性质及其侵蚀产沙的影响[J].中国草地学报,2019,41(3):74-82.
- (上接第 177 页)
- [23] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等.不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J].水土保持学报,2020,34(1):27-33,40.
- [24] 周伟东,汪小钦,吴佐成,等.1988—2013 年南方花岗岩红壤侵蚀区长汀县水土流失时空变化[J].中国水土保持科学,2016,14(2):49-58.
- [25] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008:3-12.
- [26] Getnet T, Mulu A. Assessment of soil erosion rate and hotspot areas using RUSLE and multi-criteria evaluation technique at Jedeb watershed, Upper Blue Nile, Amhara Region, Ethiopia[J].Environmental Challenges,2021,4:e100174.
- [27] Anees S A, Zhang X, Shakeel M, et al. Estimation of fractional vegetation cover dynamics based on satellite remote sensing in pakistan: A comprehensive study on the FVC and its drivers[J].Journal of King Saud University-Science,2022,34(3):e101848.
- [28] 徐少杰,邓良,赵明松,等.安徽省 1980—2020 年土壤侵蚀时空变化特征[J].科学技术与工程,2023,23(1):109-116.
- [29] 余恩旭,张明芳,蒋志魏,等.岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析[J].水土保持研究,2023,30(1):1-10,17.
- [30] 徐少杰,邓良,赵明松,等.安徽省 1980—2020 年土壤侵蚀时空变化特征[J].科学技术与工程,2023,23(1):109-116.
- [31] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
- [32] 杨凯祥,刘强,李秀红,等.三峡库区土壤侵蚀和植被覆盖变化分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(5):631-638.
- [33] 张龙齐,贾国栋,吕相融,等.黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究[J].水土保持学报,2023,37(2):187-198.
- [34] 罗学升.长汀县稀土开发与水土保持对策[J].亚热带水土保持,2004,16(4):19-22.
- [35] 高兆蔚.福建长汀河田水土流失综合治理成效与继续治理对策建议[J].福建水土保持,2004,16(4):11-13.
- [36] 长汀县地方志编纂委员会.长汀县志(1988—2003)[M].北京:中华书局,2006.
- [37] Yin Z, Chang J, Huang Y. Multiscale spatiotemporal characteristics of soil erosion and its influencing factors in the Yellow River Basin[J].Water,2022,14(17):e2658.
- [38] 朱永杰,王超,刘自强.降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2021,41(6):8-14.