

# 福建省水土流失的时空变化

曾舒娇<sup>1</sup>, 汪小钦<sup>1</sup>, 陈贤干<sup>1</sup>, 王振平<sup>1</sup>, 林敬兰<sup>2</sup>, 陈善沐<sup>2</sup>

(1. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室 福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350002; 2. 福建省水土保持试验站, 福建 福州 350003)

**摘要:** [目的] 对福建省 1990—2015 年的水土流失进行动态监测和时空变化分析, 为该区水土保持工作提供科学参考。[方法] 以福建省为研究区域, 基于 USLE 水土流失方程, 结合 GIS, RS 等技术开展研究。[结果] ① 福建省境内以轻度流失为主, 水土流失主要分布在西部和东南部, 中部和北部分布较少, 在空间上呈现出东南沿海向西北内陆减少的趋势, 25 a 来以轻/中度流失与微度流失的相互转化为主。② 1990—2015 年, 福建省水土流失面积总体呈减少趋势, 共减少了 3 825.55 km<sup>2</sup>, 以轻度流失面积减少为主, 尤其在 2010 年后, 水土流失面积减少加快。相对于内陆地区, 沿海地区水土流失改善明显。[结论] 25 a 来福建省水土流失总体情况改善明显, 水土流失治理取得了显著的成效。

**关键词:** 水土流失; 时空变化; USLE; 福建省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)06-0305-08

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 曾舒娇, 汪小钦, 陈贤干, 等. 福建省水土流失的时空变化[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6):305-312. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.050; Zeng Shujiao, Wang Xiaoqin, Chen Xiangan, et al. Temporal and spatial variation of soil erosion in Fujian Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6):305-312. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.050

## Temporal and Spatial Variation of Soil Erosion in Fujian Province

ZENG Shujiao<sup>1</sup>, WANG Xiaoqin<sup>1</sup>, CHEN Xiangan<sup>1</sup>,  
WANG Zhenping<sup>1</sup>, LIN Jinglan<sup>2</sup>, CHEN Shanmu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, National Engineering Research Center of Spatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Soil and Water Conservation Experimental Station of Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350003, China)

**Abstract:** [Objective] To provide scientific basis for soil and water conservation, the dynamic monitoring and temporal and spatial variations of soil erosion in Fujian Province from 1990 to 2015 were studied. [Methods] Choosing Fujian Province as a study area, combined with GIS and RS technologies, the research was carried out based on USLE model. [Results] ① The soil erosion intensity of Fujian Province was general light. The soil erosion areas were found primarily in the western and southeastern of Fujian Province and less in central and northern parts. As to the spatial variation of soil erosion, a decreasing trend from the southeast coastal area to the northwest inland area was found existed. During the past 25 years, the transfer of soil erosion intensity mainly occurred between the light/moderate erosion and slight erosion. ② From 1990 to 2015, the area of soil erosion reduced by 3 825.55 km<sup>2</sup> totally, which was mainly covered by light erosion intensity. Especially after 2010, the area of soil erosion showed a faster shrink. Meanwhile, soil erosion in coastal areas got improvement more evidently than the erosion in inland areas. [Conclusion] The improvement of soil erosion in Fujian Province was obvious during the past 25 years, which showed significant benefits in soil erosion control.

**Keywords:** soil erosion; temporal and spatial variation; USLE; Fujian Province

收稿日期: 2017-05-04

修回日期: 2017-06-01

资助项目: 国家科技支撑计划课题“南方红壤水土流失综合监测”(2013BAC08B01); 福建省高校产学研重点项目“集成多重时空分辨率的县域水土流失遥感协同监测”(2017Y4010); 中央引导地方发展专项(2017L3012)

第一作者: 曾舒娇(1993—), 女(汉族), 福建省惠安县人, 硕士研究生, 研究方向为环境与自然资源遥感应用。E-mail: 393847086@qq.com。

通讯作者: 汪小钦(1972—), 女(汉族), 福建省古田县人, 博士, 研究员, 主要从事资源环境遥感方面的研究。E-mail: wangxq@fzu.edu.cn。

水土流失不仅引发了土壤养分流失、生产力下降等问题,甚至造成泥沙淤积,加剧洪涝灾害,因此水土流失监测和治理一直是大家关注的重点。近年来,国内外大量的研究将遥感等空间信息技术与水土流失模型结合进行水土流失监测<sup>[1-2]</sup>,根据建模手段和方法可将模型分为经验统计模型和物理成因模型<sup>[3]</sup>。经验统计模型因结构简单得到了广泛应用,包括 USLE 模型<sup>[4]</sup>、RUSLE 模型<sup>[5]</sup>及 CSLE 模型<sup>[6]</sup>。其中 USLE 模型由于形式简单,各参数表征方式易实现,适用性强,被广泛应用于世界各国不同区域和尺度的水土流失估算中<sup>[7-9]</sup>。福建省以丘陵山区为主,降雨强度大而集中,风化作用强烈,是南方红壤区的典型水土流失区。据普查资料显示<sup>[10]</sup>,其水土流失面积在 1985 年高达 21 130 km<sup>2</sup>,至 2011 年为 12 180.58 km<sup>2</sup>,水土流失仍较严重。2012 年以来,福建省大量投入水土流失治理经费,水土流失情况又有较大变化。因此,及时有效分析福建省水土流失时空变化规律,对水土流失防治与管理具有重要意义。针对福建省的水土流失监测与分析,已有的研究成果<sup>[11-13]</sup>多以定性分析为主,关于近些年来水土流失定量分析和时空变化规律探寻还未有深入的研究。USLE 模型在国内南方红壤区、黄土丘陵区等热门区域得到了较好的推广<sup>[14-15]</sup>,因此,本研究基于 USLE 方程,结合 GIS、RS 等技术,对福建省 1990—2015 年的水土流失进行动态监测和时空变化分析,为该省的水土保持工作提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海,东北与浙江省毗邻,西、西北与江西省交界,西南与广东省相连,东隔台湾海峡与台湾岛相望,地理位置为北纬 23°33′—28°20′,东经 115°50′—120°40′。夏季高温多雨,冬季温和少雨,是典型的亚热带海洋性季风气候,平均气温为 15.3~21.9℃,平均降雨量为 1 400~2 000 mm。林地、裸地、耕地、居民地和水体是主要的土地利用类型,地势总体上西北高东南低,境内多山地丘陵。土壤类型有红壤、黄壤,母岩多为花岗岩和砂页岩,由于境内降雨多且集中,风化作用强烈,极易发生水土流失,加上近几十年来人类活动对生态环境的影响,使得福建省成为我国南方红壤区水土流失较为严重的地区之一。福建省共有 9 个地级市,其中沿海城市包括福州市、莆田市、泉州市、厦门市、漳州市和宁德市,内陆城市包括南平市、三明市和龙岩市。

### 1.2 数据来源

本文所需数据包括:① 遥感数据以 Landsat 系列 1990,2000,2010 和 2015 年 4 个时期的 TM/ETM<sup>+</sup>/OLI 影像为主,其中全覆盖 6 景,部分覆盖 7 景。同时获取由美国宇航局 NASA 提供的相应时相的 MODIS NDVI 产品、GIMMS NDVI 产品用于遥感影像季相归一化,其中 GIMMS NDVI 为 15 d 合成的数据集,MODIS NDVI 为 16 d 合成的数据集。以上数据主要用于植被覆盖度计算及土地利用分类中,用于估算  $C$ 、 $P$  因子;② 降水数据资料来源于国家气象局共享的 21 个站点降雨观测数据,通过克里格插值法生成 4 个时期的栅格数据,用于计算  $R$  因子;③ 地形数据来自 ASTER 官网提供的 30 m 分辨率的 DEM 数据,用于  $LS$  因子的计算;④ 土壤数据为福建省的主要土壤类型专题图,用于  $K$  因子的计算。

### 1.3 研究方法

采用通用土壤流失方程(USLE)估算福建省土壤侵蚀模数,计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: $A$ ——年平均土壤侵蚀模数 $[(t/(hm^2 \cdot a))]$ ;  
 $R$ ——降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ ;  
 $K$ ——土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot hm^2 \cdot mm)]$ ;  
 $L, S$ ——坡长、坡度因子;  
 $C$ ——植被覆盖与管理因子;  
 $P$ ——水土保持措施因子。

降雨是引起土壤侵蚀的直接动力因子,降雨侵蚀力是表征降雨引起土壤侵蚀潜在能力的指标。采用周伏建等<sup>[17]</sup>提出的福建省降雨侵蚀力因子  $R$  的简便计算模型,其模型简单,计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (0.3046 \cdot P_i - 2.639) \quad (2)$$

式中: $R$ ——降雨侵蚀力 $[J \cdot cm/(m^2 \cdot h)]$ ,经过单位转换为国际单位 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ ;  
 $P_i$ ——月降雨量(mm)。

土壤可蚀性因子表示土壤抗侵蚀的能力,反映土壤在侵蚀外营力作用下的敏感性。本文采用方纲清等<sup>[18]</sup>利用 EPIC 模型计算的福建省主要土壤类型的  $K$  值。

坡度坡长因子  $LS$  是水土流失估算评价中的重要参数,区域  $LS$  的计算通常是利用 DEM 作为基础数据,根据水文、土壤侵蚀学原理进行因子提取。本研究利用 DEM 数据根据刘宝元等<sup>[19]</sup>的方法计算  $LS$  因子。

1.3.1 基于遥感数据的植被覆盖与管理因子  $C$  估算 植被覆盖与管理因子  $C$  是指在有植被覆盖情况下的土壤流失总量与同等情况下无植被覆盖的土壤

流失量的比值,它表示植被覆盖对水土流失的抑制作用。福建省境内丘陵山区植被分布不均,仅根据土地利用/覆盖类型进行  $C$  因子赋值会带来较大的误差,需结合植被覆盖度与  $C$  因子的关系式来确定  $C$  值。针对林草地类型,采用马超飞等<sup>[20]</sup>提出的植被覆盖与  $C$  因子的关系式确定  $C$  值,其中 Landsat 系列数据因获取的季相不同会造成植被覆盖度的估算偏差,利用陈贤干等<sup>[21]</sup>提出的方法进行季相归一化以消除季相影响。而其他的地类则采用赋值法<sup>[22]</sup>,其中水体和不透水面取 0,耕地取 0.230,其他用地(包括裸地、建设用地等)取 0.353,最终得到 4 个时期的植被覆盖和管理因子  $C$  值。

1.3.2 基于遥感土地利用/覆盖图层的水土保持措施因子  $P$  赋值  $P$  因子是指其他条件相同的情况下,实行水土保持措施(等高耕作、坡改梯等)下的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值。目前尚无  $P$  因子的定量计算方式,大多研究常以实测对

比或直接利用已有经验赋值的方式。参考已有文献<sup>[23]</sup>并根据研究区特点对不同地类进行经验赋值,林地取 1.0,农田取 0.3,水体取 0,不透水面取 0,裸地取 1.0,最后生成 4 个时期相应的  $p$  值因子图。

1.3.3 水土流失强度分布与精度验证 根据以上方法得到  $R, K, LS, C, P$  因子,由公式(1)计算福建省 1990, 2000, 2010, 2015 年 4 个时期的土壤侵蚀模数。并根据《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》规定的“土壤侵蚀强度分级标准”进行分级,获得 1990—2015 年 4 个年份的水土流失强度分级结果(图 1)。利用已有的统计数据<sup>[10]</sup>、文献<sup>[12]</sup>和野外调查资料对福建省 1990—2015 年 4 个时期的估算结果进行精度验证,其中 1990, 2000 年的估算结果与陈志强等<sup>[12]</sup>的研究结果相近,2010, 2015 年的估算结果则利用野外考察点和遥感影像的特征随机选取样本进行验证。结果表明水土流失总体精度分别达到 80.37%, 80.63%, 基本满足应用的精度要求。

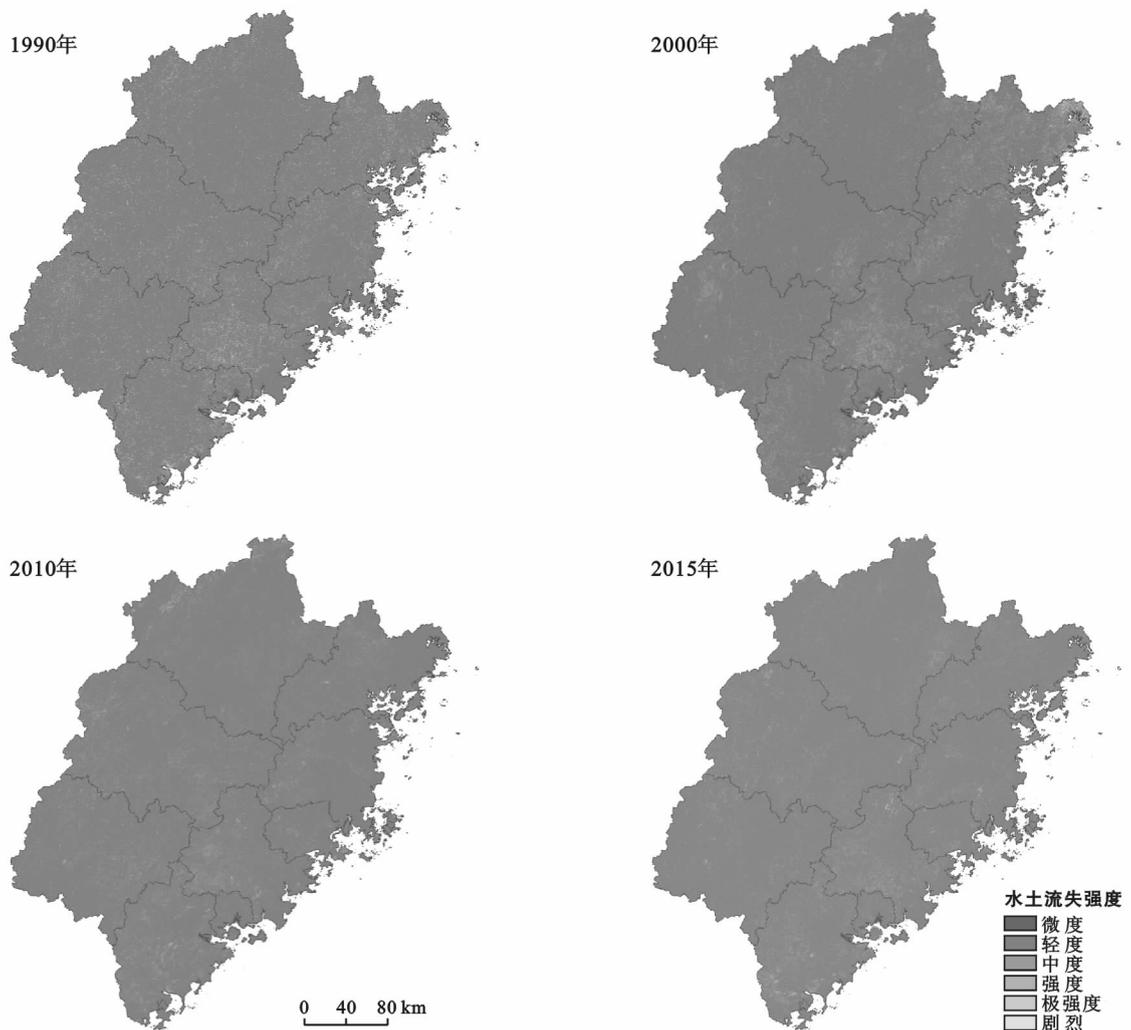


图 1 福建省水土流失强度的空间分布

## 2 分析与讨论

### 2.1 水土流失空间特征

由图1可知,福建省的水土流失以轻度为主,主要分布在西部和东南部,中部和北部区域水土流失较少,水土流失在空间分布上呈现出东南沿海向西北内陆减少的趋势。从各地市行政区分布看,泉州市和漳州市水土流失分布最广,宁德市次之,南平市分布相对较少。将4个时期的水土流失强度分布结果进行空间叠加分析并统计,得到各地市水土流失强度转化数据及空间分布(表1,图2)。

根据表1可知,1990—2015年福建省轻/中度流失转化为微度流失变化量最多,25 a共转出了9 402.37 km<sup>2</sup>,占转化总面积的57.09%。其中,各时间段转出面积分别为8 408.23 km<sup>2</sup>(1990—2000

年),7 177.07 km<sup>2</sup>(2000—2010年),7 991.65 km<sup>2</sup>(2010—2015年),占前一时期的轻/中强度流失面积的比例分别为:62.58%,66.04%,71.83%,意味着轻/中度水土流失转出量呈增加趋势,微度流失面积不断增加。

由图2可以看出,微度流失转为轻/中度流失的变化量仅次于前者,可见25 a来福建省以轻/中度水土流失与微度水土流失的相互转化为主要特征,强度以上水土流失级别的转出量只占少数,且转入面积所占比例相对很小,在空间上零星的分布于全省各地市内(图2),主要原因是随着城市化和经济建设的发展,采石、开矿、铁路修建、工业园区等建设活动改变了原有地表和植被,火烧山、砍伐破坏了植被,使生态环境遭受破坏,加剧了水土流失,因其治理难度大所以短时间内侵蚀强度难以减弱。

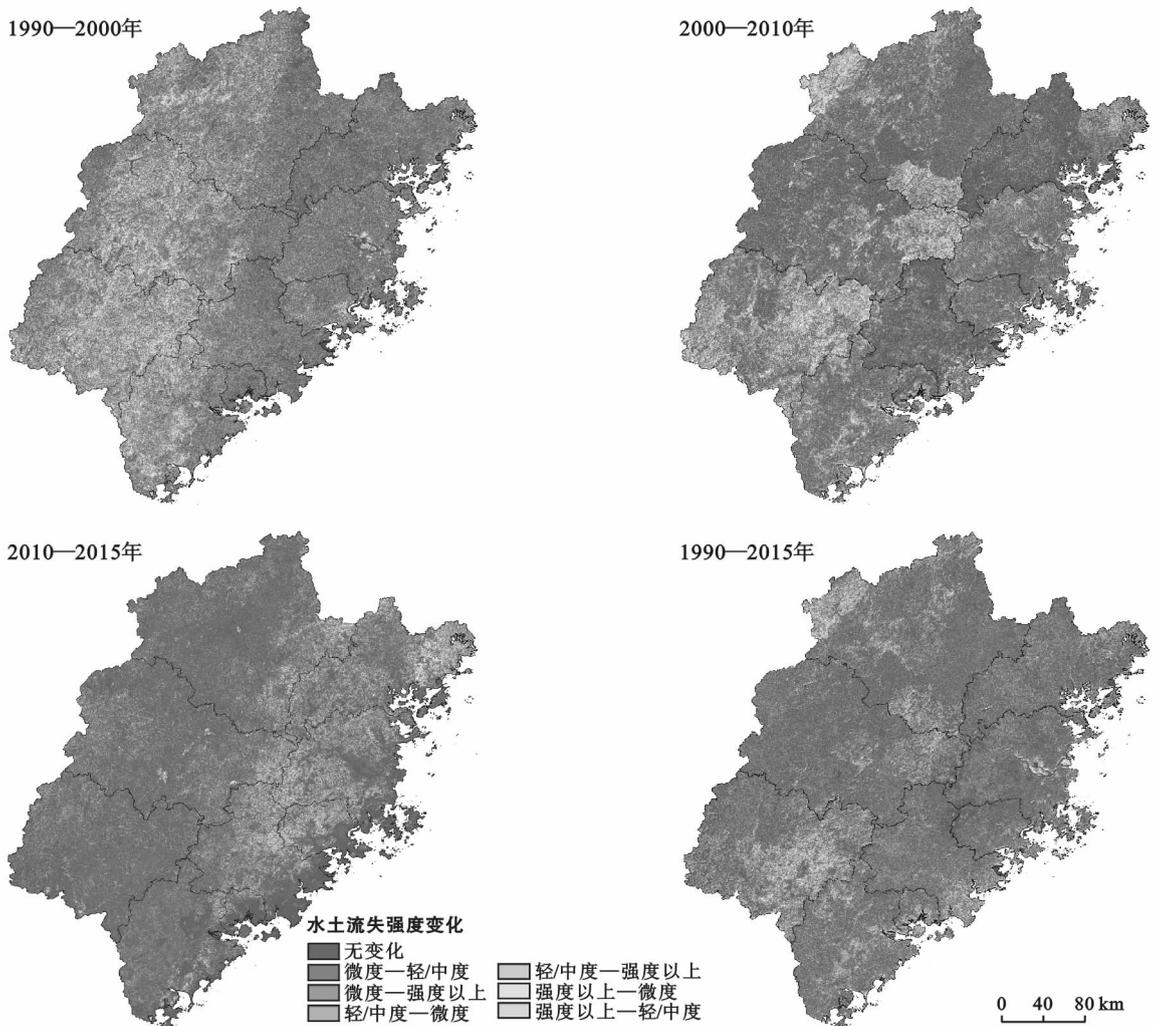


图2 福建省各地市水土流失强度变化空间分布图

水土流失强度向更高流失强度级别转化则表示水土流失程度加剧,向更低级别转化则表示水土流失

程度减轻,即改善。就各地市空间分布来看(图2),1990—2015年全省境内水土流失情况逐渐好转,沿

海地区水土流失程度明显减轻,其中微度流失新增斑块数量最多,面积均匀分布,主要由轻/中度土壤流失类型转化而来,而内陆地区水土流失程度减轻与加剧区域分布范围相当。分阶段看,1990—2000年,除南平市、宁德市水土流失程度加剧外,其他地市均以改善为主;2000—2010年,内陆城市水土流失程度总体以加剧为主,沿海城市总体以改善为主;2010—2015年,微度转为轻/中度及微度转为强度以上的斑块分

布密集,区域集中在莆田市、福州市、南平市、三明市、宁德市,而其他地市改善区域与加剧区域分布范围相当。以上各地市无流失区域多集中在城镇、农村居民点及地势平坦地区周围分布,这些区域土地利用率高,为水土保持提供了有利条件。恶化区域主要是园地、具有一定坡度的疏林地和耕地、土壤可蚀性较高地区以及遭受人类或自然破坏区域。改善区域是针对水土流失进行治理或自然恢复的区域。

表1 福建省水土流失强度变化

水土流失强度变化	面积分布/km <sup>2</sup>			
	1990—2000年	2000—2010年	2010—2015年	1990—2015年
微度—轻/中度	6 886.03	6 124.54	6 628.98	5 696.62
微度—强度以上	1 132.58	312.60	406.33	273.53
轻/中度—微度	8 408.23	7 177.07	7 991.65	9 402.37
轻/中度—强度以上	886.15	238.06	228.30	291.27
强度以上—微度	438.37	860.59	575.50	416.17
强度以上—轻/中度	262.06	1 014.19	294.15	390.59
合计	18 013.42	15 727.04	16 124.92	16 470.54

表2 福建省水土流失强度动态监测结果及变化

流失强度	面积				变化			
	1990年	2000年	2010年	2015年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2015年	1990—2015年
轻度	11 787.51	7 822.83	9 646.87	8 729.04	-3 964.68	1 824.03	-917.83	-3 058.47
中度	1 648.99	3 044.36	1 479.43	1 123.02	1 395.36	-1 564.92	-356.41	-525.97
强度	510.51	1 072.43	495.63	374.01	561.91	-576.79	-121.21	-136.50
极强度	291.43	695.37	321.65	217.73	403.94	-373.72	-103.92	-73.70
剧烈	150.07	465.55	128.03	119.11	315.47	-337.52	-8.92	-30.96
总流失	14 388.52	13 100.55	12 071.62	10 562.97	-1 287.97	-1 028.93	-1 508.65	-3 825.55
流失率/%	11.60	10.56	9.74	8.52	-1.04	-0.82	-1.22	-3.08

## 2.2 水土流失时间特征

2.2.1 福建省水土流失时间变化特征分析 表2为福建省1990—2015年4个时期各水土流失强度的流失面积、流失率及动态变化数据,图3为各水土流失强度所占国土面积比例。其中水土流失率公式为:

$$\text{水土流失率} = \frac{\text{水土流失面积}}{\text{区域国土面积}} \times 100\% \quad (3)$$

其中,水土流失面积指的是轻度及以上各流失强度级别的水土流失面积。

由表2可以看出,1990—2015年,福建省4个时期的水土流失面积呈逐年减少趋势,流失面积共减少了3 825.55 km<sup>2</sup>,约占1990年水土流失面积的1/4,对应的水土流失率从11.60%降到8.52%,流失率共减少了3.08%,可见25 a来福建水土流失总体情况得到了显著改善。分阶段看,1990—2000年,总流失

面积减少了1 287.97 km<sup>2</sup>,年均递减了128.80 km<sup>2</sup>;2000—2010年,总流失面积减少了1 028.93 km<sup>2</sup>,年均递减了102.89 km<sup>2</sup>;2010—2015年,总流失面积减少了1 508.65 km<sup>2</sup>,年均递减了301.73 km<sup>2</sup>。可见,2010—2015年水土流失年均减少面积是前两个时间段的2~3倍,主要得益于2010年之后政府大量投入水土流失治理资金,全面推广“长汀水土流失治理经验”进行区域综合治理,该时间段水土流失面积减少明显,减少速度也明显加快。就各水土流失强度动态变化量而言,轻度流失面积在2000—2010年呈增加趋势,共增加了1 824.03 km<sup>2</sup>,主要来源于中度、强度流失的转化,这与福建省2000年之后的水土流失治理成效有关,其他各时间段轻度流失面积均有所减少;中度及以上各流失强度级别面积在1990—2000年时间段均呈增加趋势,以中度流失增加为主,增幅

达 84.62%。20 世纪 90 年代中后期福建省为谋发展进行一系列的工程开发活动,破坏了地表植被及土地承载力导致了该时间段水土流失程度加重,而 2000 年之后中度及以上各流失强度级别面积均以减少为主,水土流失局面逐渐得到控制。总体而言,25 a 来福建省水土流失面积以轻度流失减少为主,共减少了 3 058.47 km<sup>2</sup>,减幅达 25.95%,中度流失次之,面积共减少了 525.97 km<sup>2</sup>;强度及以上流失面积减少不明显。图 3 为各水土流失强度所占国土面积比例结果,从中可以看出,1990—2015 年福建省水土流失以轻度流失为主,所占国土面积比例均大于 7.5%,其次是中度,强度及以上的流失强度级别比例较少。25 a 来无流失区所占比例为 88%~92%,轻度流失所占国土面积比例在 2000—2010 年有所增加,其他时间段均减少,其中以 1990—2000 年的比例减幅最大;强度及以上的流失强度级别所占国土面积比例之和在 4 个时期分别为 0.78%,1.82%,0.76%和 0.58%,呈先增加后减少趋势;中度流失则先增加,在 2000 年后又减少,稳定在 1%之间。综上所述,25 a 来福建省总体的水土流失强度在减弱,在保持轻度流失程度不加剧的情况下,中度流失区域依旧是今后防治的重点,以防止其转化为更高水土流失强度级别。

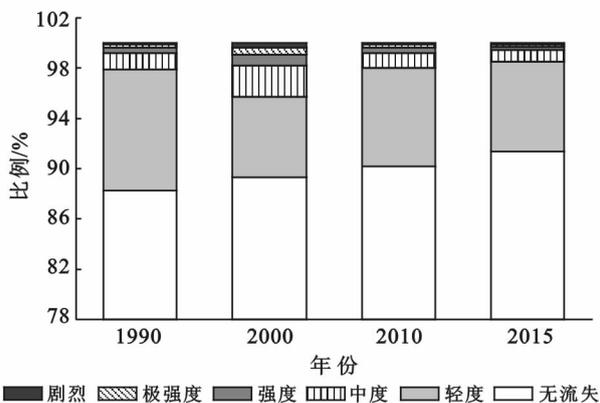


图 3 水土流失强度所占国土面积比例

2.2.2 各地市水土流失时间变化特征分析 分析福建省各地市的水土流失率、境内平均土壤侵蚀模数、流失区平均土壤侵蚀模数动态变化情况(图 4),从水土流失面积上看,1990 年水土流失最为严重;但从平均土壤侵蚀模数上看,大部分地区 2000 年水土流失最为严重。由图 4 可知,1990—2015 年福建省各地市水土流失率呈减少趋势,1990,2000 年,沿海地区的水土流失率明显大于内陆地区,而 2010 以后,沿海

和内陆的水土流失率大致相当。1990—2000 年,除宁德市流失率增加了 0.33%外,其他地市均减少,厦门市流失率下降最多,流失率下降了 2.73%,减幅达 22.83%,主要是厦门市水保部门在水土流失严重的荒山林地进行造林种草、有效地保护了地表植被,减少了水土流失;2000—2010 年,除泉州市、南平市和三明市流失率有所增外,其他地市均减少,其中以宁德市减少最为显著,流失率减少了 5.16%,减幅达 37.45%,宁德市改造旧茶园和低产果园并建立了宜茶宜果山地资源,使水土流失得到控制;2010—2015 年各地市流失率均有所减少,泉州市流失率下降最明显,减少了 2.82%,减幅达 18.03%,这得益于泉州市禁止毁林开荒,茶园间种植了隔离林带并按标准建立梯田改善了生态环境。总体而言,内陆地区自 1990 年起有明显的下降趋势,至 2000 年后减幅不明显,25 a 来流失率减幅达 21.72%,沿海地区流失率呈现出逐年递减的趋势,25 a 来流失率减幅为 31.59%,相对于内陆地区,沿海地区治理成效更显著,这与近些年来沿海地区水土流失的综合治理密切相关。由图 4 可知,1990—2015 年 4 个时期,除个别年份个别地区外,福建省大部分地市平均土壤侵蚀模数均小于 500 t/(km<sup>2</sup>·a),属轻度流失。各地市在 2000 年时的平均土壤侵蚀模数均比其他时期高,尤其宁德市表现得更为显著。2000 年以后,平均土壤侵蚀模数明显降低,大部分都小于 200 t/(km<sup>2</sup>·a),各地市之间总体上都比较接近。由图 4 可知,25 a 来各地市流失区平均土壤侵蚀模数大都分布于 1 500~3 000 t/(km<sup>2</sup>·a),属轻中度流失。除 2000 年各地市流失区平均土壤侵蚀模数比其他时期高外,其他时期各地市流失区土壤侵蚀模数较一致,且无显著变化。此外,莆田市在 2015 年流失区平均土壤侵蚀模数接近于 3 000 t/(km<sup>2</sup>·a),较其他地市偏高。总体上,25 a 来各地市平均土壤侵蚀模数与流失区平均土壤侵蚀模数动态变化特征基本一致。说明 2000 年以来,水土流失面积减少的同时,土壤侵蚀模数也得到了较为有效的控制。

### 2.3 水土流失变化原因

福建省水土流失成因复杂,引起水土流失变化的原因主要归于自然因素和人为因素。地质、地貌、气候和水文等自然因素对水土流失变化产生的影响较缓慢、低频,而人为因素对水土流失的影响则更显著、更持续。人类活动既改善一定区域范围内的水土流失也可能使其加剧,人为因素包括政策因素、经济因素、人口因素等。

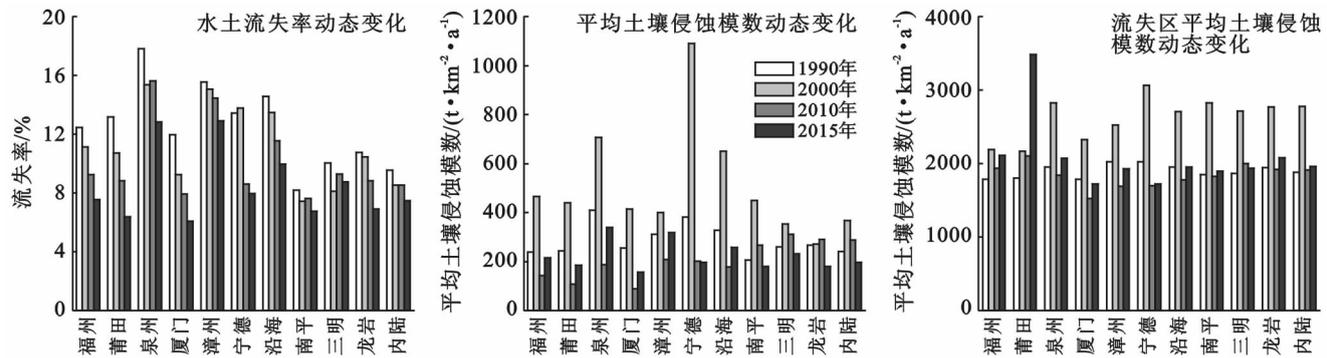


图 4 福建省各地市水土流失情况动态变化

2.3.1 政策因素 福建省水土流失面积在 1990—2015 年 25 a 来减少明显,特别是在 2000 年之后水土流失改善显著,政策因素起到了关键作用。20 世纪 90 年代中后期福建省为促经济发展忽略了水土保持,自 2000 年起,福建省委、省政府将以长汀为重点的全省水土流失综合治理列入为民办实事项目,因此水土流失规划与治理集中体现在 2000 年之后。2011—2012 年福建省获批中央水土流失专项治理资金 3.835 亿元,省级水土流失专项治理资金追加 3 亿元用于福建 22 个水土流失重点县治理<sup>[24]</sup>,2011 年全省共完成水土保持投资 45 179 万元,其中中央级省级专项补助资金 12 640 万元<sup>[25]</sup>,在大量的水土流失治理资金投入下,福建省 2010—2015 年这 5 a 来水土流失面积减幅更加明显,生态环境得到大大的改善。2000 年《生态环境保护纲要》提出要切实保护各类生态公益林,实施退耕还林还草,加大火烧迹地、采伐迹地的封山育林育草力度,减少占用林地以防止水土流失。该策略大大的提高了植被覆盖度。福建省各地因地制宜,对茶果园采取坡改梯的方式及套种绿肥的生态茶果园模式,因此泉州市在 2010 年后水土流失率下降最显著。并建立了一批板栗、杨梅园、养猪场与“草—牧—沼—果”等治理示范区,经过十几年来的治理沿海地区水土流失改善显著。同时采取了综合开发治理的策略,如龙岩市通过调整土地结构种植蜜柚、银杏、杨梅等,既改善水土流失又带来经济效益,其水土流失率在 2010—2015 年时间段下降较多。三明市因全面封禁、分类治理的策略使得水土流失有所改善,南平市林草覆盖好,通过封山育林和天然林改变了水土流失现状,因此其水土流失率总体上比其他地市低。

2.3.2 经济因素 经济因素往往成为水土流失加剧的驱动力之一,根据福建省统计年鉴资料显示<sup>[26]</sup>,福建省人均 GDP 从 1990 年的 1 763 元逐年增加到

2015 年的 67 966 元,经济的迅猛发展带动了人们对地方的开发。特别是 1990 年起人们为谋经济发展进行筑路、采矿、城市建设、交通建设等工程活动,造成地表被剥离而水土流失加剧,其影响范围大导致生态环境遭受严重破坏。主要体现在 1990—2000 年福建省水土流失大量呈现出从微度流失向轻/中度流失转移的迹象。经济发展同时加速了城市化进程,林地、地势平坦的耕地常被占用为城市扩张的备用地,不合理的土地利用方式易引起水土流失。另外,在经济利益的驱动下,大规模的山地茶果园开发成为水土流失加剧的源头。1990 年福建省茶叶种植面积为 1 167.4 km<sup>2</sup>,至 2015 年茶叶种植面积达 2 501.2 km<sup>2</sup>,经济水果林面积也从 1990 年的 2 984 km<sup>2</sup> 增加到 2015 年的 5 456.7 km<sup>2</sup><sup>[26]</sup>。大力发展茶叶、水果林种植时,普遍存在盲目超坡度开垦园林的现象,易导致水土流失加剧。此外,修建茶园梯田时没有按照修建标准且采取的耕作方式不合理,幼龄茶园行间未套种绿肥作物,都会使山地茶园流失加剧。如泉州市和漳州市,作为典型的茶园、果园种植区,水土流失率较其他地市偏高。南平市因不合理的山地资源开发模式,造成母质层出露和土壤肥力下降,同时缺乏有效的水土流失治理模式也会引起局部水土流失发生变化。

2.3.3 人口因素 人口变化与水土流失具有一定的相关性,根据统计年鉴资料显示<sup>[26]</sup>,福建省城镇人口在 2000 年为 1 432 万人,至 2015 年增长到 2 403 万人,农村人口在 2000 年为 1 978 万人,至 2015 年减少为 1 436 万人。可见随着 2000 年以来城镇化的发展,大量农村人口涌入城镇,特别是沿海地区城镇化发展迅猛,导致农村人口减少,对自然资源的需求也随之减少,因而缓解了农村地区生态环境局面,农村水土流失也随之减轻,这在一定程度上促进改善了沿海地区的水土流失情况。但城镇化发展带来的城市开发建设活动也可能使区域性水土流失加剧。

### 3 结论

(1) 福建省境内以轻度流失为主,水土流失主要分布在西部和东南部,中部和北部区域水土流失较少,在空间分布上呈现出东南沿海向西北内陆减少的趋势。25 a 来水土流失以轻/中度流失与微度流失的相互转化为主要特征。相对于内陆地区,沿海地区水土流失程度明显减弱,其治理成效更显著,这与沿海地区水土流失的综合治理密切相关。

(2) 1990—2015 年,福建省水土流失面积总体呈下降趋势,共减少了 3 825.55 km<sup>2</sup>,流失率下降了 3.08%,其中以轻度流失面积减少为主,减幅达 25.95%,特别是 2010 年之后,水土流失减少加快,主要得益于 2012 年后福建省大幅增加水土流失治理专项经费,采取有效的综合治理手段。平均土壤侵蚀模数再 2000 年最高,2010 年后基本恢复到 1990 年的水平。因此在保持轻度流失程度不加刷的情况下,中度流失区域依旧是今后防治的重点,以防止其转化为更高水土流失强度级别。

(3) 泉州市、漳州市因山地茶园流失严重,导致整体水土流失率较其他地市偏高,需加强对生态型茶果园的建设。福建省各地市水土流失成因不同,需针对性地加强对区域的水土流失治理以改善福建省整体生态环境。

(4) 遥感数据获取的季相不同会对植被覆盖与管理因子 C 的估算造成影响,本研究仅采用简单的回归方法进行归一化处理,如何消除遥感数据的季相影响有待于进一步的研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Rawat K S, Mishra A K. Soil erosion risk assessment and spatial mapping using LANDSAT-7 ETM<sup>+</sup>, RUSLE, and GIS: A case study[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(4):1-22.

[2] Comino J R, Iserloh T, Morvan X, et al. Soil erosion processes in european vineyards: A qualitative comparison of rainfall simulation measurements in Germany, Spain and France[J]. *Hydrology*, 2016, 3(1):6.

[3] 符素华,刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(1):78-84.

[4] Olson T C, Wischmeier W H. Soil-erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1963, 27(5):590-592.

[5] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation

Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. *Agriculture Handbook*, 1997.

- [6] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation[C]. Beijing: 12th ISCO Conference, 2002.
- [7] Ali S A, Hagos H. Estimation of soil erosion using USLE and GIS in Awassa Catchment, Rift valley, Central Ethiopia[J]. *Geoderma Regional*, 2016, 7(2):159-166.
- [8] Mancino G, Nolè A, Salvati L, et al. In-between forest expansion and cropland decline: A revised USLE model for soil erosion risk under land-use change in a Mediterranean region[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 71:544-550.
- [9] Jiang Chong, Wang Fei, Zhang Haiyan, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000—2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97:258-271.
- [10] 福建省水利厅,福建省统计局. 福建省第一次全国水利普查公报[M]. 福建 福州:鹭江出版社,2013.
- [11] 林敬兰,杨学震,陈明华. 基于“3S”技术的福建省土壤侵蚀动态监测研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1):155-157.
- [12] 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.
- [13] 宋锐涛,陈志彪,陈志强,等. 福建省水土流失重心迁移分析[J]. *江西农业学报*, 2011, 23(10):160-162.
- [14] 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.
- [15] Du Heqiang, Xue Xian, Wang Tao. Mapping the risk of water erosion in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(1):70-84.
- [16] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [M]. *USDA Agriculture Handbook No. 282*, 1965.
- [17] 周伏建,黄炎和. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(1):13-18.
- [18] 方纲清,阮伏水,吴雄海,等. 福建省主要土壤可蚀性特征初探[J]. *亚热带水土保持*, 1997(2):19-23.
- [19] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5):1759-1763.
- [20] 马超飞,马建文,布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(4):6-9.

- water use in the Krishna Basin, India[J]. *Irrigation & Drainage*, 2009,58(4):406-428.
- [3] Arfanuzzaman M D, Atiq Rahman A. Sustainable water demand management in the face of rapid urbanization and ground water depletion for social-ecological resilience building[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2017,10(C):9-22.
- [4] Erzin A E, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Sustainability of national consumption from a water resources perspective: The case study for France[J]. *Ecological Economics*, 2013,88(7):133-147.
- [5] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. *Water Resources Management*, 2007,21(1):35-48.
- [6] Zhang G P, Hoekstra A Y, Mathews R E. Water Footprint Assessment (WFA) for better water governance and sustainable development[J]. *Water Resources & Industry*, 2013,1/2(2):1-6.
- [7] Pires A, Morato J, Peixoto H, et al. Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,578:139.
- [8] Rouillard J, Vidaurre R, Brouwer S, et al. Governance regime factors conducive to innovation uptake in urban water management: Experiences from Europe [J]. *Water*, 2016,8(10):477.
- [9] Vollmer D, Regan H M, Andelman S J. Assessing the sustainability of freshwater systems: A critical review of composite indicators [J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2016,45(7):765-780.
- [10] Jia Shu, Huang Ying. The economic analysis of sustainable utilization of agricultural water resources in Shandong province[J]. *Energy Procedia*, 2011,5(5):2120-2124.
- [11] Yuhuan Sun, Ningning Liu, Jixia Shang, et al. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,142:613-625
- [12] Weiming Chen, Sanmang Wu, Yalin Lei, et al. China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water[J]. *Ecological Indicators*, 2017,74:321-333.
- [13] 王新华,徐中民,龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. *冰川冻土*, 2005,27(5):774-780.
- [14] 赵晨,王远,谷学明,等. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J]. *生态学报*, 2013,33(5):1636-1644.
- [15] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. *Ecosystems*, 2012,15(3):401-415.
- [16] 谷学明,王远,赵卉卉,等. 江苏省水资源利用与经济增长关系研究[J]. *中国环境科学*, 2012,32(2):351-358.
- [17] 周玲玲,王琳,余静,等. 基于水足迹理论的即墨市水资源可持续利用对策研究[J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2014,44(11):95-100.
- [18] 戚瑞,耿涌,朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. *自然资源学报*, 2011,26(3):486-495.
- [19] 刘洁,谢丽芳,杨国英,等. 丰水区城镇化进程与水资源利用的关系:以江苏省为例[J]. *水土保持通报*, 2016,36(3):193-199.
- [20] 王倩,魏巍,刘洁,等. 江苏省水资源利用相对效率时间分异与影响因素[J]. *水土保持通报*, 2017,37(1):308-314.
- [21] 岳金桂,游海霞. 江苏省水资源可持续利用问题研究[J]. *水利经济*, 2016,34(3):41-45.
- [22] 冷建飞,张倩. 基于生态足迹模型的水资源可持续利用研究:以江苏省为例[J]. *重庆理工大学学报:自然科学版*, 2015,29(7):54-59.

(上接第 312 页)

- [21] 陈贤干,汪小钦,陈芸芝. 大区域 TM 影像归一化植被指数季相归一化处理方法[J]. *遥感信息*, 2015(6):81-88.
- [22] Fu Guobin, Chen Shulin, Mccool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS[J]. *Soil&Tillage Research*, 2006,85(1):38-49.
- [23] 黄金良,洪华生,张珞平,等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. *水土保持学报*, 2004,18(5):75-79.
- [24] 何钦,孔令军. 福建省水土流失治理情况调查[J]. *调研世界*, 2014(4):34-37.
- [25] 福建省水利厅,福建省统计局. 福建省水土保持公报[J]. *福建水土保持*, 2011,2(2):1-15.
- [26] 福建省统计局. 福建统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.