

南方红壤水土流失区生态系统服务价值时空变化研究

王培俊¹ 刘旗² 孙煌¹ 林晓岚² 范胜龙¹

(1. 福建农林大学公共管理学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要: 基于 GIS 和遥感技术, 构建生态系统评价指标体系和评估模型, 对不同水土保持措施下长汀县 2005—2016 年生态系统服务价值时空变化进行了评估。结果表明: 长汀县 2005—2016 年生态系统服务价值空间上呈现四周高、中间低的分布趋势, 4 个阶段生态系统服务价值分别为 101.08、88.39、109.14、134.11 亿元, 大气平衡调节价值平均占比 35%, 水源涵养价值占比 15%, 土壤保持价值占比 21%, 营养循环价值占比 4%, 有机质生产价值占比 25%, 各项生态系统服务价值呈现先减少后增加的趋势。在不同水土保持措施下, 长汀县生态系统服务价值时空变化差异明显, 濯田镇、三洲镇、河田镇和策武镇治理效果良好, 生态系统服务价值增加显著, 但山地植被覆盖有减少趋势。建议在山地丘陵地区实行草灌乔混交治理模式、小穴播草模式和老头松改造模式, 并在破碎的崩岗裸露斑块区修建排水沟、挡土墙和沉沙池等水土保持工程设施; 在林下套种适宜的植物, 加快坡改梯进度, 并实行分工合作制; 在日常生产建设过程中注重绿化, 防止水土流失, 严格实施防止水土流失措施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的三同时制度。

关键词: 生态系统服务价值; 土地利用/覆盖变化; 水土保持; 长汀县; 遥感; 地理信息系统

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0219-10

OSID:



Temporal and Spatial Variation of Ecosystem Service Values in Red Soil Erosion Areas in South China

WANG Peijun¹ LIU Qi² SUN Huang¹ LIN Xiaolan² FAN Shenglong¹

(1. School of Public Management, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The ecosystem evaluation index system and evaluation model were constructed based on GIS and remote sensing, and the temporal and spatial changes of ecosystem service values in Changting County from 2005 to 2016 were evaluated under the impacts of different soil and water conservation measures. The results showed that the ecosystem service values of Changting County spatially presented a trend of high around and low in the middle from 2005 to 2016, and the ecosystem service values in the four stages were 10.108 billion yuan, 8.839 billion yuan, 10.914 billion yuan and 13.411 billion yuan, respectively. Atmospheric balance value accounted for an average of 35%, water conservation value accounted for 15%, soil conservation value accounted for 21%, nutrient recycling value accounted for 4%, and organic matter production value accounted for 25%. The values of various ecosystem service showed a trend of first decreasing and then increasing. Under different soil and water conservation measures, there were significant differences in temporal and spatial changes of ecosystem service values in Changting County. In the towns of Zhuotian, Sanzhou, Hetian and Cewu, the governance effect was good, and the ecosystem service values were increased significantly, but the vegetation coverage of mountainous areas tended to be decreased. It was suggested to implement the modes of grass-shrub-arbor mixed management and old pine rehabilitation in mountainous and hilly areas, and to build drainage ditches, retaining walls and sand basins in the broken bare area of collapsed hills. Besides, interplanting suitable plants under the forest, speeding up the transformation of sloping fields into terraces and implementing the system of division of labor and cooperation were also needed to be considered. In the

收稿日期: 2020-08-09 修回日期: 2020-10-15

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2019J01397)

作者简介: 王培俊(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要从事国土空间生态修复研究, E-mail: wangpeijun1227@163.com

通信作者: 范胜龙(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事土地调查与评价研究, E-mail: fsl@fafu.edu.cn

process of daily production and construction, it was important to pay attention to afforestation, prevent soil erosion, and strictly implement the three-simultaneous system of design, construction and operation of soil and water conservation projects.

Key words: ecosystem service value; land use and land cover change; soil and water conservation; Changting County; remote sensing; geographic information system

0 引言

近年来,由于可持续发展战略的实行,生态系统服务价值(Ecosystem service value,ESV)成为国内外研究热点。十七大报告首次提出“建设生态文明”的重要举措,十八大报告把“生态文明建设”作为我国的发展战略任务之一,并首次使用了“生态价值”概念,生态系统服务价值研究迎来了良好的发展机遇^[1]。生态资产评估包括自然资产估价和生态系统服务价值评估,是从整体上直接对生态系统服务价值进行评估^[2]。自然资产估价是一种外在的资产,易于评估,而生态系统服务价值是一种潜在的、长期被忽略的资产,且不便评估。因此,生态资产评估的难点在于生态系统服务价值评估。

生态系统服务价值评估研究最早始于20世纪70年代。从1972年起,美国国家自然资源调查局采用野外抽样调查统计的方法对美国生态系统服务价值进行定期调查、评估、发布,极大促进了美国各地的生态环境建设^[3]。COSTANZA等^[2]利用土地利用/覆盖数据和生态系统服务当量,计算了全球生态系统服务价值。DAILY^[4]系统地介绍了生态系统服务功能的概念、研究简史、服务价值评估、不同生物系统的服务功能以及区域生态系统服务功能等。ARKEMA等^[5]估计了伯利兹海洋生态系统的服务价值。YU等^[6]采用文献计量法研究发现,国外评价生态系统服务价值的方法多样,但经济估值方法仍是最主要的方法,同时出现了动态建模、地理信息系统(GIS)技术集成等新技术。

国内关于生态系统服务价值的研究起步较晚。潘耀忠等^[3]提出了基于遥感定量测量的生态系统生态资产评估模型,对中国陆地生态系统生态资产进行了全覆盖定量测量,并基于遥感技术获取的生态系统参数,探讨了中小尺度区域范围内生态系统生态资产变化及与人类活动的关系。谢高地等^[7-9]提出的当量因子法受到广泛应用,基于当量因子法的生态系统服务价值评估是以其中食物生产为基础当量,通过当量因子表计算出生态服务功能价值当量,该方法能够提高评估的效率。采用当量因子法,文献^[10-14]计算了长三角、三江源、银川市、川东地区和北京市不同类型生态系统的的服务价值。宁佳

等^[15]通过直接对水源涵养、土壤保持和防风固沙服务进行估算,分别探讨了各服务价值的时空变化。钱彩云等^[16]和徐建英等^[17]基于InVEST模型或模块原理,计算了产水量、碳储量、土壤保持量及农作物生产4项典型的生态系统服务。当量因子法属于静态评价,难以准确及时反映生态系统服务价值的时空变化。近年来,生态系统服务估算开始逐渐采用遥感和GIS等技术反演生态系统参数^[1,18-23]。总体而言,上述生态系统服务评价主要以大中尺度为主,关于小尺度的生态系统服务价值研究相对较少。

长汀县是南方红壤水土流失区生态破坏的重灾区之一^[24]。该地区年降雨量大,人为活动开发过度,导致水土流失严重。由于坡面水力侵蚀导致耕地退化,使江河湖泊淤积和洪涝灾害频发,这也是面源污染发生的重要形式和运输载体^[25]。近年来,长汀县生态环境整体质量不断提升,水土流失情况得到明显改善^[26]。相较于传统的静态评估,可以动态监测研究地区生态系统服务价值变化,考虑了生态系统质量时空分异,使结果真实可信,进而为生态系统服务管理提供直观可视化、定量的评价结果^[27]。本文以县域小尺度为基础,通过遥感和GIS技术研究长汀县不同水土流失治理措施下生态系统服务价值的时空变化,分析这些措施对水土流失治理的有效性和不足,进而提出优化建议,为长汀县水土流失治理和生态环境持续改善提供参考。

1 研究区概况

1.1 自然条件

长汀县地处福建省龙岩市西部山区,与广东省和江西省接壤,总面积3 089.9 km²,地理位置116°0'45"~116°39'20"E,25°18'40"~26°2'5"N(图1)。气候类型为亚热带季风性气候,年平均气温19℃,年降水量1 500 mm以上,降水集中在夏季。全县境内地形复杂,多山地丘陵,主城区位于中部,四周环山,村镇零星分布,地势崎岖。该县境内的成土母岩以花岗岩为主,雨量充沛,年内分配不均,风化作用十分强烈,易受侵蚀。植被属中亚热带常绿阔叶林区,原生植被多受土壤侵蚀和人为破坏,几乎全部转变为次生林,以针叶林为主,马尾松分布普遍,阔叶林占较少部分。该县的地貌特点、成土母岩

的岩性、植被特征和气候环境共同决定了该区域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。长汀县水土流失治理自 1940 年开始,先后设立土壤保肥实验区、长汀县河田水土保持站和建立实验基地。1980 年后以防治性治理为主,实行生物措施和工程措施相结合。1990 年后实行开发性治理。长汀县生态建设使水土流失面积不断减少,生态环境逐渐改善。

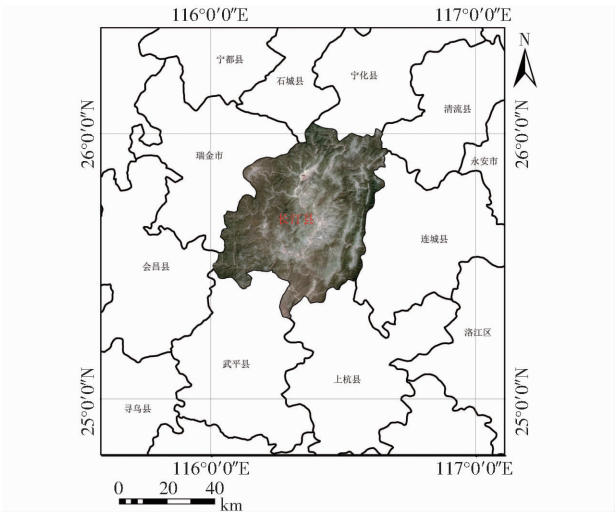


图 1 长汀县区位示意图

Fig. 1 Location schematic of Changting County

1.2 水土流失治理措施

长汀县水土保持措施主要有自然生态修复模式、等高草灌带造林技术、草灌乔混交模式、老头松改造、草-牧-沼-果循环种养模式、小穴播草模式和崩岗分类治理等^[28]。自然生态修复模式以封山育林为主,同时为当地群众提供烧煤补贴、使用沼气代替烧煤等措施。等高草灌带以河田为中心,具体措施为坡面沿等高线挖小水平沟,水平沟的断面挖成梯形,并做好沟壁,撒施生物肥,并与草灌乔混交模式结合,水平沟内种植草灌乔木,提高植被覆盖率。草-牧-沼-果循环种养模式以三洲镇、策武镇为中心,通过种植狼尾草,作为家畜饲料,家畜粪尿用于发酵并制造沼气,解决烧煤带来的环境问题,而沼渣作为果园肥料,提升果园肥力,通过各个环节的无缝链接,形成一个良性循环模式,对当地环境与经济协调发展产生良好促进作用。小穴播草模式主要是在策武镇、河田镇、三洲镇、濯田镇、涂坊镇等乡镇地区,先在冬季挖穴,春季播草种并施肥,有效改善土壤理化性质,促进生态良性循环发展。老头松是由于土壤贫瘠导致植被无法正常生长,植被单一,马尾松不能正常生长。因此,老头松改造是通过施肥、改造地形保留肥力,并补植灌草、阔叶树形成混交,促

进马尾松的生长,增加生物多样性,并改善生态环境。对于崩岗实行分类治理,稳定型崩岗施行封禁治理,自然恢复植被;活动型崩岗则采取“上拦、下堵、中绿化”的方式进行治理,是一种生物措施与工程措施相结合的方式;崩塌严重的崩岗主要以工程措施为主,修反坡台地或等高条带,种植草灌乔木植被与等高草灌带模式结合,可以有效治理崩岗。

2 研究方法与数据处理

2.1 数据来源与预处理

本研究数据主要包括遥感影像数据、气象数据、土壤数据和社会经济数据。遥感影像数据来源于地理空间数据云的 Landsat5 和 Landsat8 卫星数据,其中 2005 年和 2009 年影像来自 Landsat5 数据,2013 年和 2016 年影像来自 Landsat8 数据,分辨率均为 30 m。对其进行几何校正、辐射定标、大气校正和裁剪等预处理,得到研究区的遥感影像。对遥感影像进行监督分类,划分为 5 种生态系统类型,分别为林地、耕地、水体、裸地和建设用地。DEM(数字高程模型)数据来源于地理空间数据云,通过裁剪、坡度和水文分析工具,计算研究区坡度、坡长。气象数据来源于中国气象数据网中国地面气候资料月值数据集、中国地面国际交换站气候资料月值数据集,包括长汀县 2005、2009、2013、2016 年的 9、10 月的月平均温度、降水量、日照时数、日照百分率和经纬度等数据。辐射数据来源于中国气象数据网中国气象辐射基本要素月值数据集,包括年辐射总量和月辐射总量等数据。气象、辐射数据通过 Excel 打开,进行筛选、排序和对应台站信息等并分门别类,导入 ArcGIS 软件,进行矢量化、重投影成 Albers Equal Area Conic 投影。对气温和降水量数据进行克里金插值,对辐射数据进行反距离权重插值,用研究区矢量文件进行掩膜提取。土壤数据来源于国家地球系统科学数据中心,包含土壤黏粒、砂粒、粉粒、氮、磷、钾、碳含量和土壤深度、土壤孔隙度等,重投影成 Albers Equal Area Conic 投影。矢量数据来自地理国情检测云平台,包括长汀县边界矢量数据,通过 ArcMap 软件对中国县级行政区 2004 年数据进行导出得到。社会经济数据来自中国化肥网,包括氮、磷、钾肥价格和氮磷钾折合成化肥的比例(质量比)等。

2.2 生态参数遥感反演

2.2.1 归一化植被指数

归一化植被指数(NDVI)是植被演变研究的重要参数,可以较好地反映植被生长状态及植被的空间分布,具有覆盖范围广、分辨率高以及较易获取等

特点,成为植被研究常用指标^[29]。在生态系统服务价值评价中,NDVI 是计算净初级生产力中光合有效辐射量和植被覆盖率的重要参数。利用 Landsat 系列遥感数据为基础,对植被 NDVI 进行计算,其计算公式为

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

式中 NIR ——近红外波段反射率
 R ——红光波段反射率

2.2.2 净初级生产力

净初级生产力(NPP)是从光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[30]。在生态系统服务价值评价中,NPP 是有机质生产价值、大气平衡调节价值和营养循环价值评价的重要参数。利用潘耀忠等^[3]改进的 CASA 模型,测算长汀县 2005—2016 年 NPP,其计算式为

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \varepsilon(x,t) \tag{2}$$

式中 $APAR(x,t)$ ——像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射, $g/(m^2 \cdot 月)$
 $\varepsilon(x,t)$ ——像元 x 在 t 月的实际光能利用率, g/MJ

2.2.3 植被覆盖率

植被覆盖率 f_v 是指植被枝叶在地面的垂直投影面积占研究区域总面积的百分比^[31]。植被覆盖率深刻影响着生态系统的植被生产能力、土壤理化性质、产流汇流过程和生态系统服务功能。在生态系统服务价值评价中,植被覆盖率是评价土壤保持价值的重要参数,同时,也是影响 NDVI 和 NPP 的重要决定因素,计算公式为^[30]

$$f_v = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \tag{3}$$

式中 $NDVI_{soil}$ ——5% 下侧百分数对应的 NDVI
 $NDVI_{veg}$ ——95% 下侧百分数对应的 NDVI

2.3 生态系统服务价值评估

2.3.1 评估模型

一定区域内生态系统服务价值随着时间、区域内生态系统类型和面积变化,生态系统服务价值可表示为^[32]

$$V = \sum_{C=1}^{t'} V_C \tag{4}$$

其中 $V_C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} V_{Ci} S_{ij}$ (5)

$$R_{ij} = \frac{\frac{NPP_j}{NPP_{mean}} + \frac{f_j}{f_{mean}}}{2} \tag{6}$$

式中 V ——生态系统服务价值,元
 t' ——生态系统类型总数量
 V_C ——第 C 类生态系统服务价值,元

n ——生态系统服务功能类型总数量
 m ——第 C 类生态系统在空间上分布的像元数,个
 V_{Ci} ——第 C 类生态系统的第 i 种生态服务功能类型的单位面积价值,元
 S_{ij} ——每个像元的面积, m^2
 R_{ij} ——每个像元的调整系数
 NPP_{mean} ——区域内第 C 类生态系统植被净第一性生产力的均值, $g/(m^2 \cdot a)$
 f_{mean} ——植被覆盖率均值, %
 NPP_j —— j 像元的净第一性生产力, $g/(m^2 \cdot a)$
 f_j —— j 像元植被覆盖率, %

2.3.2 长汀县生态系统服务价值评估指标

COSTANZA 等^[2]基于生态系统服务价值评估目的,将生态系统服务价值划分为气体调节、干扰调节和基因资源等 17 个类型。谢高地等^[7]根据中国国情将生态系统服务进一步划分为气体调节、水源涵养和食物生产等 9 个类型。而生态系统服务的指标选取没有标准的选取规则,许多研究者有着各自的选取标准。本文通过借鉴文献,结合长汀县当地自然环境特征和经济社会发展状况,按照综合性、独立性和数据可获得性原则,合理选取适应长汀县的生态系统服务价值指标,构成长汀县生态服务评价指标体系,包括大气平衡调节价值、有机质生产价值、营养循环价值、土壤保持价值和水源涵养价值 5 方面。其中,大气平衡调节价值包括二氧化碳吸收和氧气产生,营养循环价值包括氮磷钾营养元素的循环,土壤保持价值包括土壤固持价值、营养元素保持价值和减少泥沙淤积价值。

2.3.3 各项生态系统服务价值计算

(1) 有机质生产价值

通过能量标煤替换法,使用标煤价值代替有机质单位质量价值,1 g 碳相当于 1.474 g 标煤。因此,有机质生产价值计算公式为^[33]

$$V_n = \sum V_n(x) \tag{7}$$

其中 $V_n(x) = 1.474 \times 10^{-6} NPP(x) O_x$ (8)

式中 V_n ——有机质生产价值,元
 $V_n(x)$ ——像元 x 处有机质生产价值,元/ $(m^2 \cdot a)$
 $NPP(x)$ ——像元 x 处的植被净初级生产力, $g/(m^2 \cdot a)$
 O_x ——标煤价格,元/g

(2) 营养循环价值

氮磷钾是营养循环的主要元素,以氮磷钾元素为基础,营养循环价值计算公式为^[27]

$$V_y = V_N + V_P + V_K \tag{9}$$

式中 V_y ——营养循环价值,元
 V_N ——每年吸收氮营养元素循环价值,元
 V_P ——每年吸收磷营养元素循环价值,元
 V_K ——每年吸收钾营养元素循环价值,元

3 种元素计算方法相同,以氮元素为例,氮元素循环价值为

$$V_N = \sum V_N(x) \tag{10}$$

其中 $V_N(x) = NPP(x) R_1 R_2 M \tag{11}$

式中 R_1 ——不同生态系统中氮元素在有机质中的分配率,g/g
 R_2 ——纯氮折算成尿素的比例
 M ——尿素价格,元/g

当元素为氮时,采用尿素作为氮肥, R_2 为 100/46, M 为 1.95×10^{-9} 元/g(中国化肥网,http://www.fert.cn/);当元素为磷时,采用磷酸二铵为磷肥, R_2 为 100/20, M 为 2.1×10^{-9} 元/g;当元素为钾时,采用氯化钾为钾肥, R_2 为 100/30, M 为 1.8×10^{-9} 元/g, R_1 见表 1。

表 1 不同生态系统营养物质分配率

Tab.1 Nutrient distribution rate of different ecosystems

元素	林地	耕地	水体	建设用地	裸地
N	0.041 80	0.013 289	0.004 204	0.013 203	0.013 273
P	0.000 89	0.000 093	0.000 901	0.000 087	0.000 091
K	0.001 81	0.008 908	0.001 802	0.008 874	0.008909

(3) 大气平衡调节价值

大气平衡调节主要是通过光合作用和呼吸作用对大气中氧气和二氧化碳含量产生影响,而氧气的产生和二氧化碳的固定与植被净初级生产力有着密切的联系。依据碳税率和工业制氧法^[23],大气平衡调节价值计算方法为

$$V_A = \sum (V_{O_2}(x) + V_{CO_2}(x)) \tag{12}$$

其中 $V_{CO_2}(x) = 1.62NPP(x)M_cN_c \tag{13}$

$$V_{O_2}(x) = 1.2NPP(x)M_o \tag{14}$$

式中 V_A ——大气平衡调节价值,元/($m^2 \cdot a$)
 $V_{O_2}(x)$ ——像元 x 处产生氧气价值,元/($m^2 \cdot a$)
 $V_{CO_2}(x)$ ——像元 x 处固定二氧化碳价值,元/($m^2 \cdot a$)
 M_c ——碳税率价格,元/g
 N_c ——二氧化碳中碳含量,%
 M_o ——氧气价格,元/g

(4) 水源涵养价值

运用影子工程法^[33],通过土壤孔隙度和土壤深

度计算其水源涵养价值,计算公式为

$$V_w = \sum V_w(x) \tag{15}$$

其中 $V_w(x) = HW_k F(x) S_w \tag{16}$

式中 V_w ——水源涵养价值,元
 $V_w(x)$ ——像元 x 处水源涵养价值,元
 H ——土壤深度,m
 W_k ——水库单位库容投资,元/ m^3
 $F(x)$ ——土壤非毛管孔隙率,%
 S_w ——像元面积, m^2

(5) 土壤保持价值

土壤保持量为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差,土壤实际侵蚀量采用通用的 USLE 方程估算^[34],计算公式为

$$A = A_p - A_r \tag{17}$$

其中 $A_r = RKLSDP \tag{18}$

$$A_p = RKLS \tag{19}$$

式中 A ——土壤保持量,t/($hm^2 \cdot a$)
 A_p ——土壤潜在侵蚀量,t/($hm^2 \cdot a$)
 A_r ——土壤实际侵蚀量,t/($hm^2 \cdot a$)
 R ——降水侵蚀力因子,($MJ \cdot mm$)/($hm^2 \cdot h \cdot a$)
 K ——土壤可蚀性因子,($t \cdot hm^2 \cdot h$)/($hm^2 \cdot MJ \cdot mm$)
 L ——坡长因子 S ——坡度因子
 D ——植被覆盖因子
 P ——水土保持因子

3 结果与分析

3.1 生态参数分析

3.1.1 归一化植被指数

由图 2 可以看出,长汀县 NDVI 分布呈四周高、中间低的特征,城市乡村等人口聚居地 NDVI 低,山地丘陵等植被覆盖率高的地方 NDVI 较高。河田镇、三洲镇、濯田镇和策武镇等地区 NDVI 最低,在 2009 年以后明显提高。由图 3 可以看出,2005、2009、2013、2016 年 NDVI 总体上呈上升趋势,其平均值分别为 0.731 2、0.726 8、0.788 6 和 0.775 5,2005—2009 年有所下降,2009—2013 年快速上升,2013—2016 年又有所下降。

3.1.2 净初级生产力

由图 4 可以看出,长汀县 NPP 分布呈四周高、中间低的分布特征,两边多山地灌丛,植被茂盛,中间多城镇分布,植被相对稀少,河田镇、三洲镇、濯田镇和策武镇等地区 NPP 增加最为显著。由图 3 可以看出,2005、2009、2013、2016 年长汀县 NPP 平均值分别为 609.3、554.6、808.5、937.7 g/($m^2 \cdot a$),呈

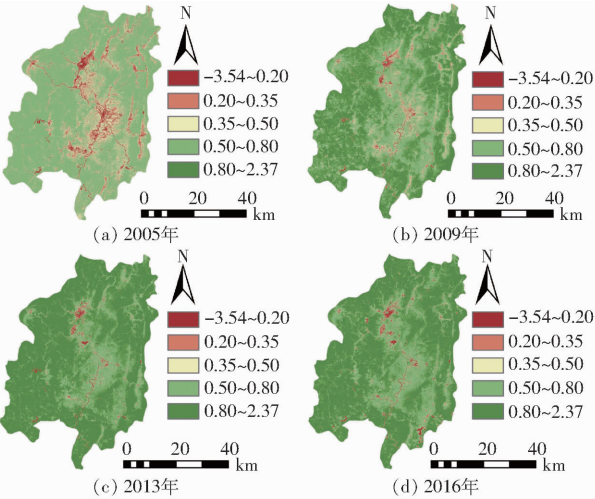


图2 2005—2016年长汀县NDVI空间分布图
Fig.2 Spatial distributions diagrams of NDVI in Changting County from 2005 to 2016

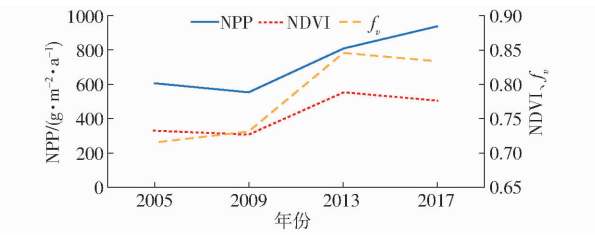


图3 2005—2016年长汀县生态参数随时间变化曲线
Fig.3 Temporal variation curves of ecological parameters in Changting County from 2005 to 2016

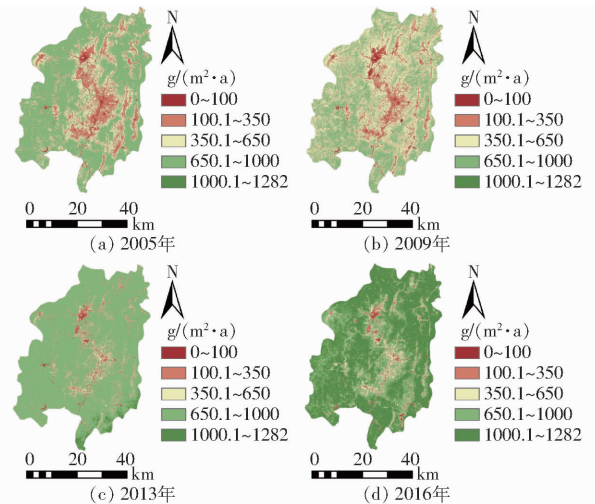


图4 2005—2016年长汀县NPP空间分布图
Fig.4 Spatial distribution diagrams of NPP in Changting County from 2005 to 2016

先减少、后增加、且年际变化大的特征。各年NPP生产总量分别为189.9、172.8、251.7、286.9万t。NPP总体趋势为随着时间而增长,其中2005—2009年NPP较低,2005—2009年NPP有所下降,2009—2016年快速上升。

3.1.3 植被覆盖率

从图5可以看出,长汀县植被覆盖率呈四周高、

中间低的特征,人口聚居的城镇乡村植被覆盖率低。2005—2016年长汀植被覆盖率总体呈上升趋势,河田镇、三洲镇、濯田镇等地区植被覆盖率明显增加,2005—2009年缓慢上升,2009—2013年快速上升,2013—2016年有所下降。从图3可以看出,植被覆盖率 f_v 在2005—2013年呈增长趋势,2013—2016年呈下降趋势,其中2005—2009年增长较少,2009—2013年快速增长,2013—2016年植被覆盖率有所下降。

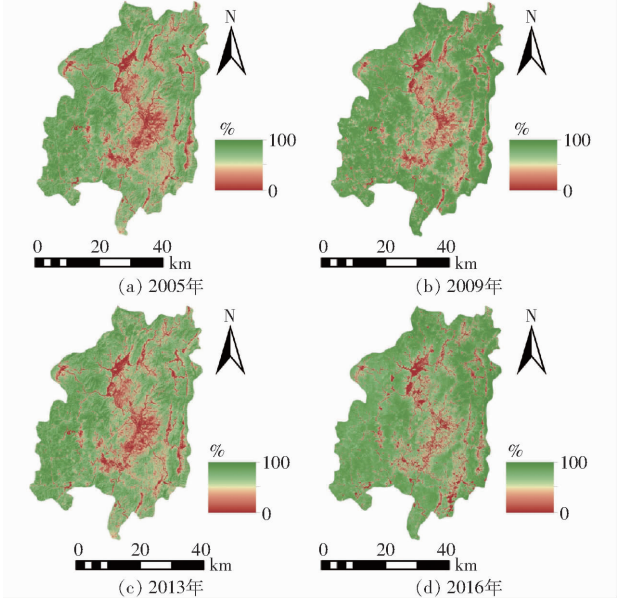


图5 2005—2016年长汀县植被覆盖率空间分布图
Fig.5 Spatial distribution diagrams of vegetation coverage in Changting County from 2005 to 2016

NPP、NDVI、 f_v 三者 在时间变化上有着相近的增长规律,总体都呈波动上升趋势,生态环境不断改善。但不同参数之间各有特点,2013—2016年NPP持续增长,而NDVI和 f_v 有所下降;2005—2009年NPP和NDVI有所下降,而 f_v 呈上升趋势。

3.2 生态系统服务价值时空分布特征分析

图6表明长汀县生态系统服务价值总体呈现四周高、中间低的趋势,生态系统服务价值和NDVI、NPP、 f_v 分布基本一致,在植被覆盖率高的地方生态系统服务价值同样高,在人口聚居地区生态系统服务价值低。此外,河田镇、三洲镇、涂坊镇、濯田镇和策武镇等水土流失严重地区生态系统服务价值显著提升。

从表2可以看出,各项生态系统服务价值呈先减少后增加的趋势。2005—2016年综合大气平衡调节价值平均占比35%,水源涵养价值占比15%,土壤保持价值占比21%,营养循环价值占比4%,有机质生产价值占比25%。除营养循环价值较低外,各生态系统服务价值较为均衡。大气平衡调节价值

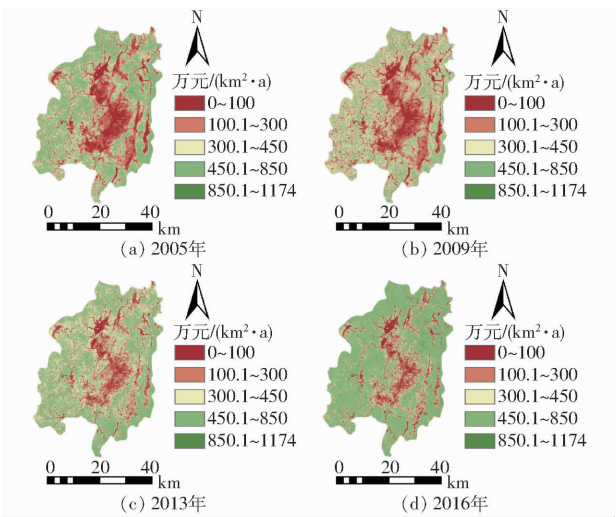


图 6 2005—2016 年长汀县生态系统服务价值空间分布图
Fig. 6 Spatial distribution diagrams of ecosystem service values in Changting County from 2005 to 2016

最高,各生态系统服务价值由大到小依次为大气平衡调节价值、有机质生产价值、土壤保持价值、水源涵养价值、营养循环价值。

表 2 2005—2016 年生态系统服务价值
Tab. 2 Ecosystem service values from 2005 to 2016
亿元

年份	服务价值					合计
	大气平衡 调节	水源 涵养	土壤 保持	营养 循环	有机质 生产	
2005	31.74	17.40	25.60	3.67	22.67	101.08
2009	28.88	13.63	21.93	3.33	20.62	88.39
2013	42.06	16.53	15.65	4.85	30.05	109.14
2016	48.36	16.28	29.35	5.57	34.55	134.11

从图 7 可以看出,研究区 2005—2016 年 4 个阶段生态系统服务价值分别为 101.08、88.39、109.14、134.11 亿元,平均值为 327.08、286.07、353.20、434.05 万元/(km²·a),按年份由小到大排序为 2009 年、2005 年、2013 年、2016 年。长汀县生态系统服务价值总体呈上升趋势,其中 2005—2009 年负增长 13%,减少 12.69 亿元,2009—2016 年持续增长,其中 2009—2013 年增长 23%,共 20.75 亿

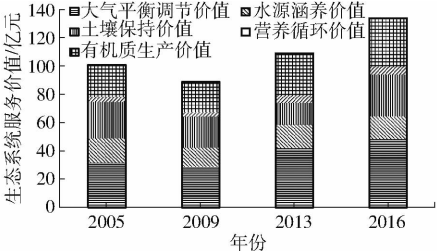


图 7 长汀县 2005—2016 年不同年份生态系统服务价值对比
Fig. 7 Comparison of different ecosystem service values in Changting County from 2005 to 2016

元,2013—2016 年增长 23%,共 24.97 亿元,12 年来生态系统服务价值增长 33.03 亿元。

由图 8 可以看出,在人口聚居的乡镇,尤其是濯田镇、三洲镇、河田镇和策武镇的水土流失区生态系统服务价值增加最为显著,多数达到 120 万元/km² 以上。在山地植被覆盖区生态系统服务价值增长较少,大部分在 120 万元/km² 之内。少数地区生态系统服务价值减少,是由于生态环境退化和建设用地增加等因素造成。

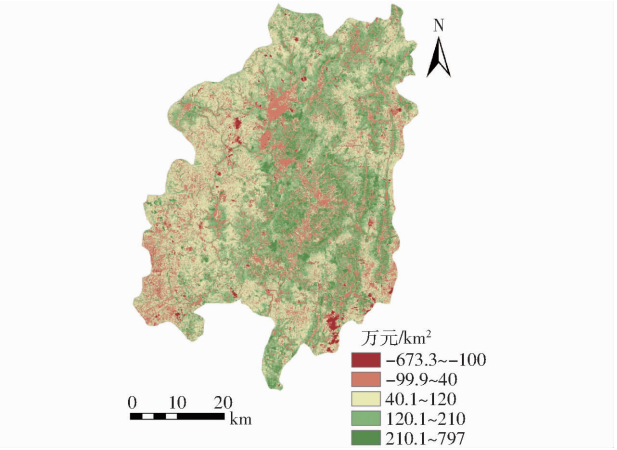


图 8 长汀县 2005—2016 年生态系统服务价值时空变化
Fig. 8 Spatial and temporal changes of ecosystem service values in Changting County from 2005 to 2016

4 讨论

影响生态系统服务价值变动的因素复杂多样,有太阳辐射、气温、降水、地形、土壤、植被、人类活动、消费价格变化等,大多数是不可控因素,而植树造林是最经济有效的方法。因此,提高植被覆盖率对 NDVI、NPP 和生态系统服务价值具有重要意义。作为生态系统服务价值评价的重要参数,NDVI 和植被覆盖率呈先减少、后增加,然后减少的趋势;NPP 呈先减少、后增加的趋势,与生态系统服务价值变化相同。在 2013—2016 年,植被覆盖率和 NDVI 有所下降,而 NPP 和生态系统服务价值却仍在增加。由 2016 年气象条件得知,当年降水丰富,气温偏高,虽然植被覆盖率和 NDVI 减少且太阳辐射有所下降,但 NPP 仍然增长非常快,导致生态系统服务价值偏高,而气候条件如气温、降水、太阳辐射往往是不可控的,不能全归因于长汀县水土保持措施的改善。

长汀县 2005 年生态系统服务价值偏低,是由于厄尔尼诺现象导致中国东南地区干旱和洪涝灾害频繁,植被生长环境较差,植被生产力偏低^[35-36],此外,当年水土流失非常严重。2009 年生态系统服务价值有所下降,是由于长汀县植被破坏严重,多处地

表裸露。2013年生态系统服务价值明显提升,裸露地区多覆盖草被树木,是因为福建省实施的“四绿”工程(让森林进城、上路、下乡、进村)和2011年实施的“生态省”建设起到了积极作用,政策上注重生态环境保护,植树造林,使植被覆盖率明显增加^[37]。2016年生态系统服务价值继续快速提升主要是因为当年降水丰富,达到2 467.6 mm,较常年高800 mm,年均温达21.7℃,较常年高2~3℃,植被生产力偏高。同时,在一定范围内,土壤保持量与降水量成正比,相关系数达到0.91,当年土壤保持价值也非常高。空间上,在山地丘陵地带生态系统服务价值增长较慢,在乡镇周围水土流失区增长较快,主要是由于山地丘陵地区以植被自然恢复为主,人工干预少,而乡镇周围采取了各种人工恢复措施,促使生态系统服务价值快速增加。

不同生态系统服务价值增长规律也不同,大气平衡调节价值、有机质生产价值和营养循环价值增长规律一致,其相关系数达到0.99,三者与植被净初级生产力密切相关,都是呈先减少后增长的趋势,在2009—2013年增速达到46%。土壤保持价值在2005—2013年呈递减趋势,在2013—2016年增长88%。2005、2009、2013、2016年降水量分别为1 740、1 505、1 268.8、2 467.6 mm,土壤实际侵蚀量随降雨量变化呈现先减少后增加趋势,土壤潜在侵蚀量也呈现同样趋势,但增减幅度更大,因而土壤保持价值呈现先减少后增加趋势。水源涵养价值呈先减少、后增加,然后平稳发展的趋势,是因为植被覆盖和土壤保持量增加,水源涵养量也在上升。

长汀县多年来有着丰富的水土流失治理经验,不同地区的治理措施各有不同,各种措施相互作用,但不同措施的治理效果不尽相同。长汀县水土流失区主要分布在濯田镇、三洲镇、河田镇和策武镇4个乡镇,其水土保持措施多样,且通常多种治理措施同时使用。长汀县水土保持措施主要有自然生态修复模式、等高草灌带造林技术、草灌乔混交模式、老头松改造、草-牧-沼-果循环种养模式、小穴播草模式和崩岗分类治理等^[26]。不同措施各有优势,自然生态修复模式顺应生态系统演替规律,有效且省力,但不适合水土流失严重地区;草灌乔混交模式在中、轻度水土流失区域增加了生物多样性,改变单一的针叶林分,可以有效防治水土流失并促进生态稳定;等高草灌带模式采用生物措施和工程措施相结合,可以有效控制坡面水土流失;小穴播草模式注重在地表林下的强度侵蚀控制,做到多层次绿化,减少“空中绿化”现象,在侵蚀严重地区,可作为草灌乔模式的过渡模式;草-牧-沼-果循环种养模式注重经济与

环境的相互促进,形成一个良性循环,但技术要求较高;崩岗分类治理针对不同侵蚀程度的裸露地块,实行不同的治理措施,以工程措施为主,工程措施和生物措施相结合,常与等高草灌带和草灌乔模式同时使用,起到了良好效果;老头松改造主要是在贫瘠的松林进行抚育施肥,促进松树和伴生灌草生长。在濯田镇、河田镇、三洲镇和策武镇等严重水土流失地区,等高草灌带治理措施、小穴播草治理措施、草灌乔混交措施和草-牧-沼-果循环种养模式同时进行,不同措施相互结合作用下,生态系统服务价值得到显著提升。但近年来,由于水土流失反弹和产业结构不合理等原因,生态环境和经济协调度有所下降^[38]。在长汀县四周山地,存在许多破碎的裸露斑块,单纯靠自然措施恢复植被效果欠佳,近年来植被覆盖率有下降的趋势。由于当地基本上都是以马尾松为主的次生林,植被覆盖类型单一,土壤贫瘠且生态多样性差,树下灌草稀少,水土流失仍然存在,自然生态脆弱且恢复缓慢,导致长汀县西部部分山地生态系统服务价值有所下降。草-牧-沼-果循环种养模式对各个环节衔接要求高,其对经营者的知识技术水平要求较高。该模式能保持水土,促进经济发展,获得更大的经济收益,但农户限于自身文化知识,往往忽视了生态环境的保护,种植果树时常常认为林下草本植物抢夺了果树的营养,因而锄草,导致地面裸露,不仅导致水土流失更加严重,而且经济效益也没有得到增加。此外,建设用地的增加和矿区采矿导致植被覆盖减少,也是当地生态系统服务价值降低的一个重要原因。

因此,为了提升长汀县水土保持和生态环境治理效果,未来应在水土流失严重的山地丘陵地区实行草灌乔混交治理模式、小穴播草模式和老头松改造模式等措施,增加山地生物多样性和植被覆盖率,并针对破碎的崩岗裸露斑块进行专项治理,如修建排水沟、挡土墙和沉沙池等水土保持工程设施。当地有关部门应加强对村民的生态环境保护治理技术知识培训,提高村民种养水平,对于坡度大的地区实行退园还林、还草,对于坡度不大的地区,在林下套种适宜的植物,加快坡改梯进度,并实行分工合作制,共同建设经济与环境和谐发展的生态模式。此外,在日常生产建设过程中应注重绿化,防止水土流失,严格实施防止水土流失措施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的三同时制度。

5 结论

(1)长汀县2005—2016年生态系统价值服务空间呈现四周高、中间低的分布趋势,4个阶段生态

系统服务价值分别为 101.08、88.39、109.14、134.11 亿元,按年份由小到大排序为 2009 年、2005 年、2013 年、2016 年。在河田镇、策武镇、三洲镇和濯田镇 4 个乡镇生态系统服务价值增加最为显著,其他乡镇各有不同程度的增加。

(2)长汀县 2005—2016 年综合大气平衡调节价值平均占比 35%,水源涵养价值占比 15%,土壤保持价值占比 21%,营养循环价值占比 4%,有机质生产价值占比 25%,除营养循环价值较低外,各生态系统服务价值较为均衡,大气平衡调节价值最高,由小到大排序为营养循环价值、水源涵养价值、土壤保持价值、有机质生产价值、大气平衡调节价值。各项生态系统服务价值呈现先减少、后增加的趋势。

(3)在不同水土保持治理措施下长汀县生态系

统服务价值时空变化差异明显,濯田镇、三洲镇、河田镇和策武镇采取等高草灌带治理模式、草灌乔混交模式、草-牧-沼-果循环种养模式和小穴播草模式,治理效果良好,生态系统服务价值显著增加。

(4)在水土流失严重的山地丘陵地区建议实行草灌乔混交治理模式、小穴播草模式和老头松改造模式等,并针对破碎的崩岗裸露斑块进行专项治理,如修建排水沟、挡土墙和沉沙池等。在坡度大的地区实行退园还林、还草,在坡度不大的地区,林下套种适宜的植物,加快坡改梯进度,并实行分工合作制。在日常生产建设过程中应注重绿化,防止水土流失,严格实施防止水土流失措施与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的三同时制度。

参 考 文 献

[1] 宋学飞. 深圳湾红树林海岸带生态资产遥感评估[D]. 广州: 广州大学, 2013.
SONG Xuefei. Ecological assets assessment based on remote sensing model in the Shenzhen Bay Mangrove Coastal Zone[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2013. (in Chinese)

[2] COSTANZA R, D'ARCE R, GROOT R D. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(15): 253-260.

[3] 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, 34(4): 375-384.
PAN Yaoshong, SHI Peijun, ZHU Wenquan, et al. Remote sensing quantitative measurement of ecological assets in China's terrestrial ecosystem[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2004, 34(4): 375-384. (in Chinese)

[4] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D C: Island Press, 1997.

[5] ARKEMA K K, VERUTES G M, WOOD S A, et al. Embedding ecosystem services in coastal planning leads to better outcomes for people and nature[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(24): 7390-7395.

[6] YU Huajun, WANG Yutao, LI Xiao, et al. Measuring ecological capital: state of the art, trends, and challenges[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219(3): 833-845.

[7] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196. (in Chinese)

[8] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Changshun, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746. (in Chinese)

[9] 肖玉, 谢高地, 安凯. 莽措河流域生态系统服务功能经济价值变化研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 676-680.
XIAO Yu, XIE Gaodi, AN Kai. Economic value of ecosystem services in Manguo Lake drainage basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 676-680. (in Chinese)

[10] 高扬, 李加林, 刘瑞清, 等. 长江三角洲核心区绿地系统时空演变特征及生态服务价值评估[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 956-968.
GAO Yang, LI Jialin, LIU Ruiqing, et al. Temporal and spatial evolution of greenspace system and evaluation of ecosystem services in the core area of the Yangtze River Delta[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 956-968. (in Chinese)

[11] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.
ZHENG Defeng, HAO Shuai, LÜ Leting, et al. Spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships among multiple ecosystem services in Three-River-Source National Park[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 64-78. (in Chinese)

[12] 郭婉婷, 邓宇. 银川市生态系统服务价值评价及驱动力分析[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29(6): 26-29, 41.

[13] 韩蕊, 孙思琦, 郭涿, 等. 川东地区生态系统服务价值时空演变及其驱动力分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1136-1143.

[14] HAN Rui, SUN Siqi, GUO Luo, et al. Evolution of ecosystem service value and analysis of driving forces in the East Region of Sichuan Province, China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(9): 1136-1143. (in Chinese)

[15] 李虹, 唐秀美, 赵春江, 等. 基于力矩平衡点法的北京市生态系统服务价值时空分布[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 151-156.
LI Hong, TANG Xiumei, ZHAO Chunjiang, et al. Spatiotemporal distribution of ecosystem service value in Beijing based on moment equilibrium point method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 151-156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151121&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.021. (in Chinese)

[16] 宁佳, 邵全琴. 黄土高原土地利用及生态系统服务时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 774-785.
NING Jia, SHAO Quanqin. Temporal and spatial characteristics of land use and ecosystem services in the Loess Plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 774-785. (in Chinese)

[17] 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.
QIAN Caiyun, GONG Jie, ZHANG Jinxi, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: a

- case study of Bailongjiang Watershed, Gansu[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 868–879. (in Chinese)
- [17] 徐建英, 陈吉星, 刘焱序, 等. “一带一路”地区生态系统服务关系的时空分异与区域响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3258–3270.
- XU Jianying, CHEN Jixing, LIU Yanxu, et al. Spatio-temporal differentiation of interaction of ecosystem services and regional responses in the “Belt and Road” area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3258–3270. (in Chinese)
- [18] 钱大文, 曹广民, 杜岩功, 等. 2000—2015年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1392–1404.
- QIAN Dawen, CAO Guangmin, DU Yangong, et al. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in the southern slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1392–1404. (in Chinese)
- [19] 陈曦, 张清, 周可法, 等. 干旱区生态资产遥感感量化评估及其动态变化分析[J]. *科学通报*, 2006, 51(增刊1): 168–174.
- CHEN Xi, ZHANG Qing, ZHOU Kefa, et al. Remote sensing quantitative evaluation and dynamic change analysis of ecological assets in arid area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Supp.1): 168–174. (in Chinese)
- [20] 王红岩, 高志海, 李增元, 等. 县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(22): 7156–7168.
- WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al. The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7156–7168. (in Chinese)
- [21] 侯淑涛, 郑绪玲, 邸延顺, 等. 哈尔滨市生态资产遥感测量评估[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 305–309.
- HOU Shutao, ZHENG Xuling, DI Yanshun, et al. Evaluation of ecological assets in Harbin City by the quantitative method of remote sensing[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2015, 22(2): 305–309. (in Chinese)
- [22] 王培俊, 孙煌, 华宝龙, 等. 福州市滨海地区生态系统服务价值评估与动态模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(3): 249–257.
- WANG Peijun, SUN Huang, HUA Baolong, et al. Evaluation and dynamic simulation of ecosystem service value in coastal area of Fuzhou City[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3): 249–257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200329&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.029. (in Chinese)
- [23] 王平. 基于时序遥感影像的贵州典型石漠化地区生态资产评估及时空变化研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017.
- WANG Ping. Evaluation of regional ecological assets and the change of time and space study in typical rocky desertification of Guizhou based on temporal remote sensing images[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017. (in Chinese)
- [24] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(南方红壤区卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [25] 蒋涛, 谢炎敏, 陈志彪, 等. 福建省长汀县不同水保措施的减流减沙效应[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(6): 35–41.
- JIANG Tao, XIE Yanmin, CHEN Zhibiao, et al. Reduction of water flow and sediment under different water conservation measures in Changting County of Fujian Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(6): 35–41. (in Chinese)
- [26] 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.
- ZHOU Weidong, WANG Xiaoqin, WU Zuocheng, et al. Spatio-temporal variation of the soil and water loss in Changting County of granite red soil eroded area of Southern China from 1988 to 2013[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(2): 49–58. (in Chinese)
- [27] 于德永, 潘耀忠, 刘鑫, 等. 湖州市生态资产遥感测量及其在社会经济中的应用[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 404–413.
- YU Deyong, PAN Yaozhong, LIU Xin, et al. Ecological capital measurement by remotely sensed data for Huzhou and its socio-economic application[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3): 404–413. (in Chinese)
- [28] 谢炎敏, 刘文, 彭绍云, 等. 长汀水土保持新时期实践探索[J]. *亚热带水土保持*, 2019, 31(2): 42–48.
- [29] 张静静, 郑辉, 朱连奇, 等. 豫西山地植被 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)
- [30] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413–424.
- ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413–424. (in Chinese)
- [31] 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.
- [32] GUTMAN G, IGNATOV A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533–1543.
- [33] 周冬梅. 基于 GIS 和 RS 技术的生态资产价值评估研究——以广东省连南县为例[D]. 南宁: 广西师范学院, 2015.
- ZHOU Dongmei. Study of ecological asset valuation based on GIS and RS: a case from Liannan County, Guangdong Province, China[D]. Nanning: Guangxi Normal University, 2015. (in Chinese)
- [34] 古娟, 王华静. 土壤保持功能评价方法研究[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(21): 47–49, 52.
- [35] 崔林丽, 杜华强, 史军, 等. 中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(5): 787–793.
- CUI Linli, DU Huaqiang, SHI Jun, et al. Spatial and temporal pattern of vegetation NPP and its relationship with climate in the Southeastern China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(5): 787–793. (in Chinese)
- [36] 刘欢, 刘冰, 施泽杰, 等. 福建省植被 NPP 时空格局及其驱动力分析[J]. *测绘科学*, 2018, 43(3): 51–57.
- LIU Huan, LIU Bing, SHI Zejie, et al. Analysis of vegetation NPP spatiotemporal pattern and driving force in Fujian[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(3): 51–57. (in Chinese)
- [37] 康冬, 陈传明, 王强. 2000—2017年福建省植被 NDVI 变化特征[J]. *台湾农业探索*, 2018(6): 25–31.
- [38] 范胜龙, 张珊珊, 邱凌婧, 等. 福建省长汀县生态环境建设与经济发展的协调关系研究[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(3): 175–184.
- FAN Shenglong, ZHANG Shanshan, QIU Lingjing, et al. Coordination relationship between ecological environment construction and economic development in Changting County, Fujian Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(3): 175–184. (in Chinese)