

生态承载力与生态系统生产总值耦合的生态系统服务评估

—以福建省长汀县为例

陈华阳^{1,2,3}，王 远^{1,2}，黄逸敏^{1,2}，伍博炜^{1,2}，赖文亭^{1,2}

(1.福建师范大学福建省亚热带资源与环境重点实验室,福州 350007;
2.福建师范大学地理科学学院,福州 350007; 3.自然资源部资源环境承载力评价重点实验室,北京 101149)

摘要：生态系统质量是区域探索生态优先、绿色发展为导向的高质量发展的重要基础。开展区域生态系统服务评估可获取国土空间生态本底特征,为生态系统保护格局构建提供现状底图,明确生态系统修复重点、国土空间优化提供导向。以长汀县为例,基于地区生态典型性、区域生物量差异及公众支付意愿与能力构建特色评价指标,采用生态承载力与生态系统生产总值耦合研究方法,对长汀县生态系统服务进行县域、镇域、村域及系统斑块等多尺度评估。结果表明:长汀县生态系统服务等级空间分布符合区划规律,大致呈中间低、四周高的特征;尺度细化使结果分布异质性更强,可为开展生态修复、空间优化提供更具针对性的建议;长汀县生态系统较为脆弱,低生态等级乡镇个数占比高达 38.89%,影响因素多样,水土流失及森林覆盖率影响显著;地形地势、人类活动、政策实施影响生态承载力的空间分布,地势平坦的人口稠密区系生态承载力低值集中区;森林生态系统在生态系统生产总值评估中扮演重要角色,生态系统生产总值均值等级极高的 4 个乡镇,其森林生态系统面积皆占 89%以上。通过对生态承载力与生态系统生产总值耦合的方法进行探究,有利于推进“两山”理论的应用实践,将为地区生态系统服务提升与空间发展提供参考建议。

关键词：生态承载力；生态系统生产总值；生态系统服务评估

中图分类号：F301.24;X171.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2021)05-0150-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.022

Evaluation of Regional Ecosystem Services Grade Coupling Ecological Carrying Capacity and Gross Ecosystem Product

— A Case Study of Changting County, Fujian Province

CHEN Huayang^{1,2,3}，WANG Yuan^{1,2}，HUANG Yimin^{1,2}，WU Bowei^{1,2}，LAI Wenting^{1,2}

(1.Fujian Provincial Key Laboratory for Subtropical Resources and Environment,Fujian Normal University,Fuzhou 350007; 2.School of Geographical Sciences,Fujian Normal University,Fuzhou 350007; 3.Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources of People's Republic of China, Beijing 101149)

Abstract: Ecosystem quality is essential for the region to explore new high-quality development methods with ecological priority and green development-oriented. Carrying out regional ecosystem service assessment can obtain the land space's ecological background characteristics, provide a base map of the status quo for the construction of ecosystem protection patterns, clarify the focus of ecosystem restoration, and provide guidance for the optimization of land space. This study concentrated on the Changting County of Fujian Province and attempted to explicitly elucidate its ecosystem services at the county, town, village, and system patch scales. Our methodology's distinctive contribution was that we coupled the ecological carrying capacity and gross ecological product approaches and set specific evaluation indicators based on regional ecological representativeness, regional biomass differences, and public willingness to pay and competence. The results showed that the ecosystem services grade conformed to the zoning rules, roughly appearing the low characteristics in the middle and high in the surroundings. Refinement of the scale made the distribution of results more heterogeneous, providing targeted suggestions for ecological restoration and space optimization. The ecosystem was relatively fragile in Changting County, with low ecological level townships accounting for as

high as 38.89%. The influencing factors were diverse, among which soil erosion and forest coverage had a significant impact. Topography, human activities, and policy implementation affected the spatial distribution of ecological carrying capacity, and densely populated areas with flat terrain were concentrated areas with low ecological carrying capacity. Forest ecosystems value was the dominant part of the gross ecological product in Changting County. The forest ecosystem area accounted for more than 89% in the four townships with extremely high average gross ecological product level. The methodology applied in the study could help promote the application and practice of the “two mountains” theory. Our findings will provide recommendations on regional ecosystem services function improvement and spatial development.

Keywords: ecological carrying capacity; gross ecosystem product; ecosystem services assessment

2019 年国土空间规划工作全面开展,2020 年《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》印发,其目的均为优化国土空间,前提皆需摸清生态系统现状。生态系统服务是生态系统形成和维持人类赖以生存和发展的环境条件与效用,进行生态系统服务评估可为国土空间规划、资源管理及生态系统服务优化调控等提供科学依据^[1-2]。生态承载力(ecological carrying capacity, ECC)与生态系统生产总值(gross ecosystem product, GEP)是生态系统服务评估的重要组成部分,分别以物理量和币值评估生态系统服务能力^[2]。ECC 反映资源合理开发和环境良性循环条件下复合生态系统的承载能力与承载对象压力^[3];GEP 代表区域生态系统为人类提供的最终产品和服务及其价值的总和^[4]。然而,现实情况是我国部分地区生态环境承载力达到或接近上限,生态系统服务功能成效不明显,生态保护和修复系统性不足^[5]。因此,耦合 ECC 与 GEP,开展区域生态系统服务评估,可促进生态系统服务的承载力、经济效益及其国土空间格局的优化配置,是响应时代所需,便于决策使用,具有创新性意义和价值。

在研究内容上,ECC 关注区域生态环境,即“绿水青山”的功能现状;GEP 关注区域生态资产,即“金山银山”的经济价值。二者是“两山”理论的重要支撑,各有侧重,又互为补充。然而,ECC 与 GEP 的研究长期处于独立状态,使得生态系统服务的区域关联性和差异性认识不足,ECC 缺乏对生态系统的经济考量,GEP 忽视同一生态系统质量差异,进而限制国土空间的优化配置。

在研究方法上,ECC 研究包括模型评估法、定量指标法、生态足迹法、状态空间法等^[3,6-9]。模型评估与定量指标法相结合,既能有效反映其空间分异又能对发展提出针对性建议,具有较好的实践应用价值^[6,10]。GEP 核算方法大致可分 2 类,即基于单位服务功能价格的方法和基于单位面积价值当量因子的方法,相对服务价值法而言,当量因子法的评价方法和参数标准统一,数据需求少,运用较广^[11]。但大

多数 GEP 研究仍忽视区域生物量差异及公众支付意愿与能力,使核算结果存在较大误差,难以落实^[12]。

在研究尺度上,现有 ECC 研究在区域^[9,13]、省域^[8]、市(县)域^[14]尺度较集中;现有 GEP 研究大多也仅对市(县)级及以上行政单位进行核算^[15-18];二者现有研究大多都集中于市县以上的单一尺度,对乡镇及以下的微观尺度研究较少,更缺乏对市县一乡镇一村庄及更小尺度的生态系统连贯性研究,使得区域内部的空间差异性被忽视,各层级空间规划尺度体系的有效衔接和指导无法实现,措施针对性不足^[19]。

ECC 与 GEP 是区域生态系统服务评估的重要组成部分,但鲜有学者将 ECC 与 GEP 耦合,对区域生态系统服务进行综合评估。因此,本研究基于长汀县生态系统特征,依托地理学空间分析优势,融合 ECC 与 GEP,关注公众支付意愿,以乡镇、村庄及生态系统斑块为研究单元,构建区域生态系统服务评估体系,获取区域生态系统服务等级和空间特征。研究着眼于区域生态承载和生态系统价值的综合评估及问题预防^[20]。旨在总结“两山”理论的实践案例,优化国土空间,推动国土保护与开发,为地区开展国土空间规划、生态保护和修复提供参考建议。

1 研究区概况

长汀县位于福建省西南部(116°02′—116°40′E, 25°04′—26°02′N),下辖 18 个乡(镇),300 个村(居),详见图 1。长汀县在全国生态保护中扮演重要角色,拥有“国家级自然保护区”“中国生物多样性保护优先区域”“全国重要生态系统保护和修复重大工程”。此外,长汀亦是我国南方红壤侵蚀退化区的典型代表,其水土流失具有历史长、面积广、程度重的特点。2000 年,在时任省长习近平的指示下,“以长汀为重点的水土流失综合治理”项目开展,形成水土流失治理的“长汀经验”,为生态文明建设提供了重要参考。长汀县生态系统集资源丰富性、生态脆弱性、示范重要性为一体,进行 2019 年 ECC 与 GEP 耦合的生态系统服务评估,是推进其国土空间规划、生态环境保护的重要基础工作,具有典型意义和研究特色。

2 研究方法与数据来源

研究将相关数据置入 ArcGIS 中,转化为 25 m×25 m 的栅格数据,统一投影,并对每幅图进行修边处理,以供进行 ECC 与 GEP 数据空间分析和耦合叠加,对长汀县生态系统服务进行评估^[7]。先对长汀县 ECC 及 GEP 进行等级评估,分为“极低、较低、中等、较高、极高”5 个等级,再根据短板原理,采用取最小值法对长汀县 ECC 与 GEP 进行取值,后将 5 个等级进行重分类,把“极低、较低”等级归为低生态服务等级,“中”等级归为中生态服务等级,“较高、极高”等级归为高生态服务等级,获得长汀县生态系统服务等级及其空间特征。并以典型地块为例,对区域生态系统类型进行服

务等级分析,以便明确不同尺度、不同生态系统服务等级区域未来发展的方向及关注点(图 2)。

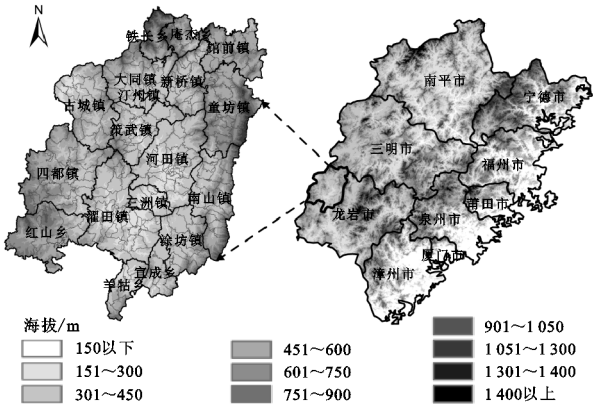


图 1 研究区位置

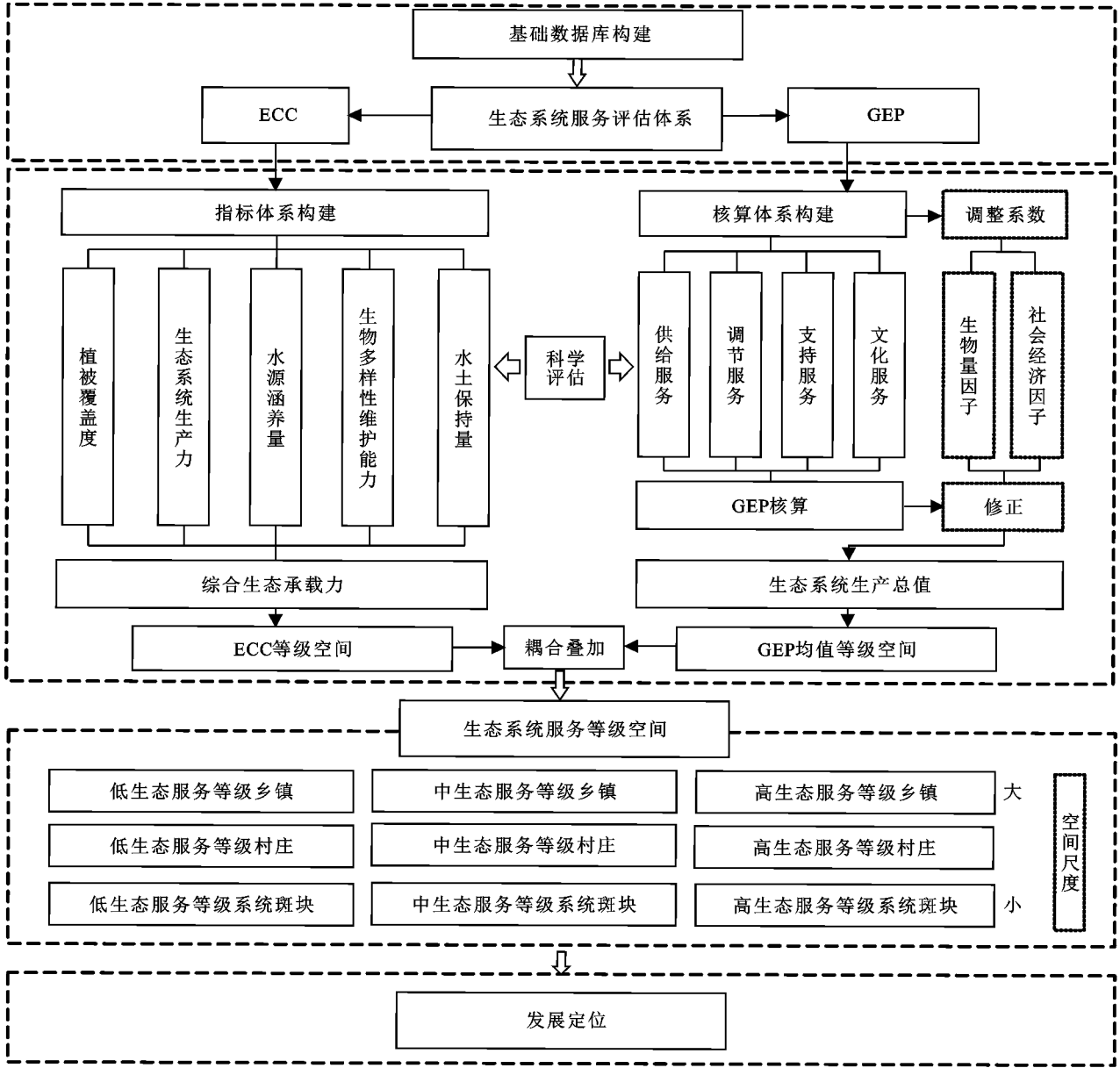


图 2 研究分析框架

2.1 ECC 指标体系与评价方法

本文生态承载力评价方法参照现有评价标准^[6-7,21]结合地区特色,基于前人^[10]经验及专家打分

法并强化水土保持指标权重,构建长汀县生态承载力指标体系(表 1)。为进一步分析长汀县各生态指标空间分布特征,运用自然断点法将各指标分为“极低、

较低、中、较高、极高”5 个等级,统计指标均值,分析分布特征。采用离差标准法对各指标进行归一化处理,根据权重进行叠加分析,获得长汀县生态承载力。为增加评价结果的针对性,以乡镇、村庄、生态系统斑块为单位分别提取区域均值,对承载力进行分级评价,从不同尺度分析长汀县生态承载力空间特征^[10]。

表 1 生态承载力指标体系

目标层	指标层	指标权重
生态承载力	植被覆盖度	0.167
	生态系统生产力	0.167
	水源涵养量	0.167
	生物多样性维护能力	0.167
	水土保持量	0.332

2.1.1 植被覆盖度评价 植被覆盖度是生态系统植被覆盖状况的特征指标。根据已有研究^[22]结果,将植被覆盖度划分为极低($f_c<0.2$)、较低($0.2\leq f_c<0.4$)、中($0.4\leq f_c<0.6$)、较高($0.6\leq f_c<0.8$)、极高($f_c\geq 0.8$)5 级。

2.1.2 生态系统生产力评价 生态系统生产力采用植被净初级生产力(net primary product,NPP)进行评价。NPP 是评估生态系统功能及生态环境质量的有效指标,对 NPP 的空间格局分析能直观了解其高、低值区。

2.1.3 水源涵养量评价 以水源涵养量作为衡量指标^[6],主要考虑河流源区、气候、地表覆盖、地形等因素,具体公式为:

$$TQ=\sum_i(P_i-R_i-ET_i)\times A_i\times 10^3\quad (1)$$

$$R_i=P_i\times \alpha\quad (2)$$

式中: TQ 为总水源涵养量 (m^3); P_i 为降雨量 (mm); R_i 为地表径流量 (mm); ET_i 为蒸散发量 (mm); A_i 为第 i 类自然资源系统像元面积 (km^2); i 为研究区第 i 类自然资源系统类型; j 为研究区自然资源系统类型数; α 为平均地表径流系数 (%)。

平均地表径流系数 α 采用长汀县自然资源解译数据中的自然资源系统类型与“各类生态系统地表径流系数均值”^[6]进行参照对比、修正获得(表 2)。

2.1.4 生物多样性维护能力评价 以生物多样性维护服务能力指数作为评估指标^[6],计算公式为:

$$S_{bio}=NPP_{mean}\times FD_{pre}\times F_{tem}\times (1-F_{alt})\quad (3)$$

式中: S_{bio} 为生物多样性维护服务能力指数,无量纲; NPP_{mean} 为多年植被净初级生产力平均值 ($g\ C/(m^2\cdot a)$); F_{pre} 为多年平均降水量 (mm); F_{tem} 为多年平均气温 ($^{\circ}C$); F_{alt} 为海拔因子 (m)。

2.1.5 水土保持量评价 水土保持功能以水土保持量作为评价指标,其中 RUSLE 模型公式为:

$$A=R\times K\times LS\times C\times P\quad (4)$$

潜在土壤侵蚀量不考虑土地覆盖类型和土壤管

理因素,即 $C=1,P=1$;因此,RUSLE 模型变成:

$$A_p=R\times K\times LS\quad (5)$$

上面 2 式相减得到水土保持量,公式为:

$$A_c=R\times K\times L\times S\times (1-C\times P)\quad (6)$$

式中: A 为单位面积年平均土壤侵蚀量 ($t/(hm^2\cdot a)$); A_p 为潜在土壤侵蚀量 ($t/(hm^2\cdot a)$); A_c 为水土保持量 ($t/(hm^2\cdot a)$); R 为降雨侵蚀力因子 ($(MJ\cdot mm)/(hm^2\cdot h\cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子 ($(t\cdot hm^2\cdot h)/(hm^2\cdot MJ\cdot mm)$); L 为坡长因子,无量纲; S 为坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖与管理因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲。

2.2 GEP 核算体系与评价方法

研究结合长汀县土地利用类型及生态系统特点,参照朱治州等^[23]研究结果,将长汀县 2019 年自然资源类型转化为相应生态系统类型,其中建设用地、未利用地及其他用地等自然资源类型归为荒漠生态系统(表 2);以前人^[11,24]提出的当量因子法为基础,构建长汀县 GEP 核算体系,并引入生物量因子调整系数和社会经济因子调整系数进行价值修正^[12],获取长汀县的最终 GEP。

表 2 自然资源类型与生态系统类型转化

生态系统类型	相应 1 类资源类型	相应 2 类资源类型	平均地表径流系数/%
农田	耕地	水田	24.70
		旱地	49.69
	园地	果园	9.57
		茶园	7.90
		其他园地	9.57
森林	林地	乔木林	2.67
		竹林	2.67
		灌木林	2.67
		其他林地	19.20
草地	草地	其他草地	18.27
水域	河流	河流水面	0
	其他水域	水库水面	0
湿地	河流	河流滩涂	0
	其他水域	水库滩涂	0
		淡水养殖场	0
		坑塘	0
		沟渠	0
荒漠	建设用地	城镇村庄	—
		交通运输用地	—
		采矿用地	—
		其他建设用地	—
	未利用地	裸地	—
	其他	其他	—

注:为避免负值,本文计算水源涵养量将建设用地、未利用地及其他用地排除在外;—表示不适用。

根据 Su 等^[12]最新成果对生态系统服务价值进

行修正,使其更真实地反映区域 GEP 实际情况,更有利于区域绿色经济协调发展。具体公式为:

$$GEP=\sum(A_i\times VC_i\times S_i\times PI)\tag{7}$$

式中:GEP 为研究区生态系统价值总量(元); A_i 为第 i 类生态系统的面积(hm^2); VC_i 为第 i 类生态系统单位面积生态服务价值(元/ hm^2); S_i 为生物量因子调整系数; PI 为社会经济因子调整系数。其中 PI 的计算公式为:

$$PI=W_t\times A_t\tag{8}$$

$$W_t=\frac{W_s}{W_g}\tag{9}$$

$$W=\frac{2}{1+e^{-m}}\tag{10}$$

$$m=\frac{1}{En}-2.5\tag{11}$$

$$En=En_r\times(1-P_u)+En_u\times P_u\tag{12}$$

$$A_t=\frac{GDP_{ms}}{GDP_m}\tag{13}$$

式中: W_t 为支付意愿; A_t 为支付能力; W_s 和 W_g 分别为研究区域的支付意愿参数和国家规模的支付意愿参数; W 为 W_t 支付意愿的参数; m 为社会发展阶段的系数; En 为第 t 年的恩格尔系数(%); En_r 和 En_u 分别为第 t 年的农村恩格尔系数(%)和城市恩格尔系数(%); P_u 为城镇人口的比例(%); GDP_{ms} 和 GDP_m 分别为第 t 年研究区的人均 GDP(元/人)和国家规模的人均 GDP(元/人)。

2.3 数据来源

本研究所用的 2019 年长汀县自然资源数据,以 2017 年自然资源矢量数据为基础,利用 2019 年国土资源 3 号卫星数据进行变更调查形成。长汀县 2000

年、2005 年、2010 年的净初生产力由 Landsat 影像数据反演植被覆盖度获得;2019 年植被覆盖度数据由 Landsat 影像处理获得。DEM 数据源自地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。长汀县 1998—2019 年的月降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>);蒸散发数据来自国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统网站(<http://www.cnern.org.cn/>);各乡镇年均降水及气温数据来自《中华人民共和国政区大典(福建省卷)》^[25]。土壤类型数据源于国家地球系统科学数据共享平台—土壤科学数据中心的 2018 年福建省土壤类型矢量图(<http://soil.geodata.cn/>);相关经济数据源自国家、长汀县统计局官网(<http://www.stats.gov.cn/>; <http://www.changting.gov.cn/>)。

3 结果与分析

3.1 长汀县生态承载力

3.1.1 单项指标分析 由评价结果(表 3 和图 3)可知,长汀县整体植被覆盖率较高,各乡镇植被覆盖度空间分布表现出高值区集中连片,中低值区零星布点的特征(图 3a)。年净初级生产力整体质量较高,空间分布呈现中部低,四周高的环形结构特征(图 3b)。等级相同或相近的乡镇分布集中连片,极低值区呈点状。水源涵养量较高,各乡镇水源涵养量空间分布呈现南北走向的条带状分布特征,高值区主要集中连片位于东、西部地区,低值区主要位于中部地区(图 3c)。生物多样性维护能力整体质量中等偏上,其高值区位于东南地区,低值区位于西南、西北地区(图 3d)。长汀县整体水土保持状况不佳,全县水土保持等级以较低等级为主,呈现中部低四周高的相对分布特征(图 3e)。

表 3 各乡镇生态承载单项指标等级统计

指标类型	乡镇面积占比/%					最值乡镇	
	极低	较低	中等	较高	极高	最低	最高
植被覆盖度	0.14	—	2.00	73.17	24.68	汀州镇	铁长乡
生态系统生产力	0.14	—	16.74	50.90	32.22	汀州镇	羊牯乡
水源涵养量	0.14	—	37.58	57.84	4.43	汀州镇	庵杰乡
生物多样性维护能力	14.59	9.95	39.97	35.48	—	汀州镇	南山镇
水土保持量	2.15	93.42	4.43	—	—	汀州镇	铁长乡

注:—表示无该等级乡镇面积占比。

3.1.2 生态承载力集成评价 长汀县 ECC 通过对各指标进行归一化处理和权重叠加分析获得。将 ECC 评价结果与各项指标评价结果对比(图 3 和图 4)可知,长汀县东部、西部、北部山高坡陡,人员稀少,生态系统较稳定,各单项指标等级较高。中等以下的区域集中于中部的盆谷、河谷平原区域,其中汀江河谷平原低等级区最为集中。例如,中部是汀江干流流经地,却是水源涵

养中低等级集中区,其主要原因在于沿江地区地势较低缓,人口活动频繁,是长汀县城及开发区所在地,城镇化程度较高,地表硬化明显,下渗不足。水土保持量指标等级空间分布对长汀县 ECC 等级空间分布影响最为明显,单位面积土壤保持量中等以下区域集中于中部地区,质量等级最高区域位于西北部地区,进而影响生态承载力的高低值区域相应分布。而全县较高的植被覆

盖率得益于多年来的水土流失治理工程。可见,ECC 与地形地势、人口活动及政策实施有密切联系^[26]。

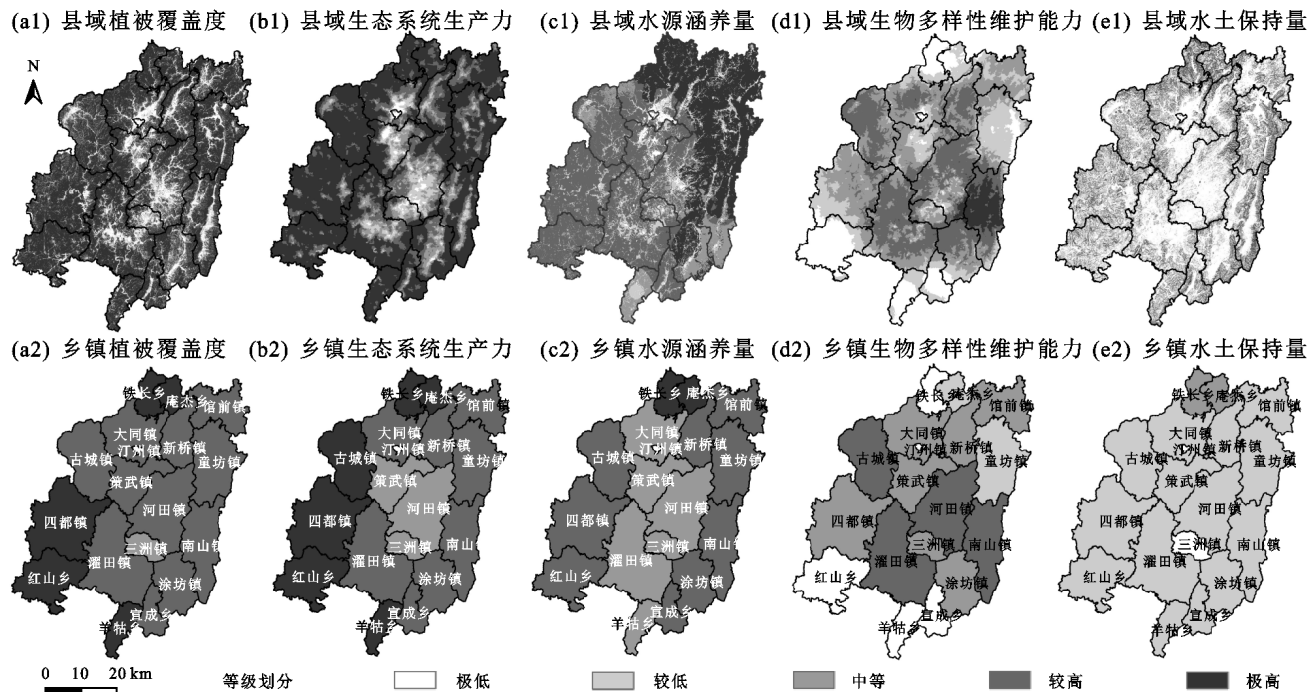


图 3 长汀县全域及乡镇生态承载力各项指标等级空间分布

由图 4 可知,县域尺度空间分布上,长汀县整体 ECC 空间分布呈现东西高,中部低的空间特征,ECC 低值区集中于中部的盆谷平原、河谷平原区域,其中河田盆地及汀江河谷平原是低等级区最为集中的区域。但县域尺度仅可获悉 ECC 的地理空间分布,无法明确各乡镇 ECC 等级,不利于基层政府的生态治理措施制定。以乡镇为单位进行分析可知,乡镇 ECC 质量中等偏上,不同等级乡镇面积占比分别为低等 22.15%(极低 0.14%、较低 22.01%)、中等 30.28%、高等 47.57%(较高 17.53%、极高 30.04%);相同或相近的乡镇连片分布,东北部较高 ECC 乡镇连片面积较大,中部较低 ECC 乡镇连片面积较大,其中 ECC 最低的乡

镇为汀州镇。从村级尺度进行分析可知,村庄 ECC 质量中等偏上,不同等级村庄面积占比分别为低等 19.03%(极低 4.15%、较低 14.88%)、中等 24.33%、高等 56.64%(较高 29.79%、极高 26.85%)。对比乡镇、村级级别分析成果可知,村级尺度低、中等(高)等级面积有所减少(增加),但极低(极高)等级面积明显增多(减少)。

综上所述,研究尺度细化更能反映区域内 ECC 的现实状况,释放出更多开发潜力;使空间差异更显著,凸显同承载等级乡镇或同一乡镇内的村庄承载力等级大小及分布差异;亦使生态脆弱区行政范围更明确,有利于各级政府生态保护措施的精确定位。

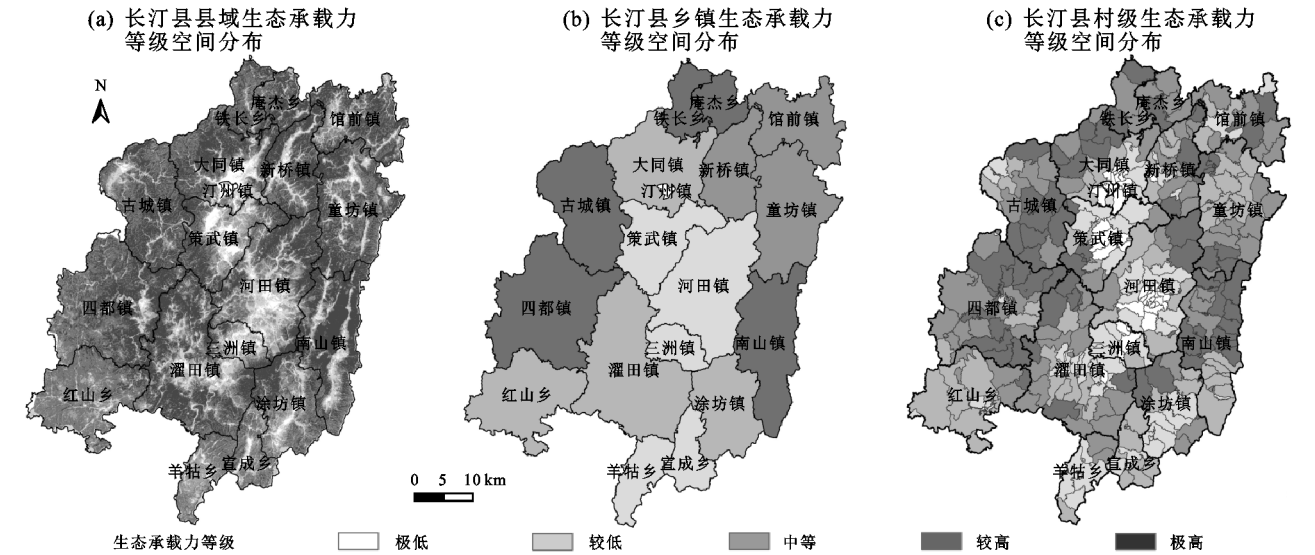


图 4 2019 年长汀县 ECC 等级空间分布

3.2 长汀县生态系统生产总值

1 个标准单位生态系统生态服务价值当量因子指 1 hm²平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值^[11],为符合研究区域的地区特色,福建省标准当量因子价值为 3 148.54 元/hm²^[12];生物量因子调整系数 S_i 为 1.571^[12];社会经济因子调整系数 PI 为 0.71,其中支付意愿 W_i 为 0.696,支付能力 A_i 为 1.019(由 2020 年统计局最新数据处理获得)。依据表 2 将长汀县自然资源类型转化为相应生态系统类型并统计可得,2019 年长汀县各生态系统面积及占比分别为:森林面积 258 175.80 hm²,83.27%;草地面积 6 303.17 hm²,2.03%;农田面积 30 007.93 hm²,9.68%;湿地面积

854.75 hm²,0.28%;水域面积 2 250.10 hm²,0.73%;荒漠面积 12 472.67 hm²,4.02%。

通过公式(7)计算可知,长汀县 GEP 为 280.05 亿元,生态系统类型按服务价值贡献大小排列为森林>水域>农田>草地>湿地>荒漠(表 4)。从服务类型上看,长汀县的调节服务价值量最高,文化服务价值量最低。细化至 2 级服务类型分析可知,水文调节功能价值最高,维持养分循环功能价值最低。调节服务的高占比得益于多年水土治理政策带来的植被覆盖率提升,养分循环功能的薄弱也与治理工程种植树种及所形成的次生林生态系统较为单一有关^[26]。而充分发挥资源优势打造生态旅游产业,则是提升文化服务价值的关键措施。

表 4 长汀县生态系统生产总值 单位:亿元

1 级类型	2 级类型	森林	草地	农田	湿地	水域	荒漠	总计
供给服务	食物生产	2.99	0.10	1.05	0.02	0.06	0.01	4.23
	原材料生产	27.01	0.08	0.41	0.02	0.02	0.02	27.56
	水资源供给	2.81	0.06	—1.38	0.08	0.65	0.01	2.23
调节服务	气体调节	39.15	0.33	0.76	0.06	0.06	0.03	40.39
	气候调节	36.89	0.35	1.02	0.11	0.18	0.06	38.61
	水文调节	37.07	0.34	0.81	0.73	8.08	0.03	47.06
	净化环境	15.68	0.30	0.15	0.11	0.44	0.14	16.82
支持服务	土壤保持	36.44	0.50	1.55	0.07	0.07	0.07	38.70
	维持养分循环	1.63	0.03	0.17	0.01	0.01	0	1.85
	生物多样性	40.88	0.41	1.07	0.24	0.20	0.18	42.98
文化服务	美学景观	18.85	0.19	0.18	0.14	0.15	0.11	19.62
总计		259.40	2.69	5.79	1.59	9.92	0.66	280.05

由图 5 可知,在空间分布上,各乡镇 GEP 大小与乡镇面积关系密切。为更深入了解长汀县 GEP 实际情况及其背后的资源本底状况差距,研究以各乡镇、村庄 GEP 均值为指标,运用自然断点法进行 GEP 等级划分,获得长汀县乡镇、村级 GEP 均值等级空间分布。乡镇尺度分析可知,长汀县乡镇 GEP 均值各等级面积占比分别为低等 16.33%(极低 0.14%、较低 16.19%)、中等 31.98%、高等 51.69%(较高 29.07%、极高 22.62%)。高值区位于西南部与北部乡镇,低值区位于中部与西北部。村级尺度细分可知,各等级面积占比分别为低等 20.97%(极低 0.43%、较低 20.54%)、中等 9.56%、高等 69.47%(较高 31.68%、极高 37.79%)。

此外,在长汀县 GEP 均值等级极高的 4 个乡镇中,其森林生态系统面积皆占有主导性地位,铁长乡为 92.99%,四都镇为 92.12%,红山乡为 91.58%,羊牯乡为 89.41%。而 GEP 均值等级中等以下的 3 个乡镇,其森林生态系统面积占比均低于全县均值,其中汀州镇仅 15.04%。可知,森林生态系统面积大小

对地区 GEP 大小有重要影响,良好的森林覆盖率在长汀县 GEP 等级评估中的具有重大贡献。

综上可知,与 ECC 分析结果相似,乡镇、村级尺度 GEP 均值等级分布及占比发生变化,村级尺度视角的低、高(中)等级面积占比增加(减少)。同等级乡镇或同一乡镇内的村域 GEP 均值等级存在差异,GEP 区域异质性更显著,低 GEP 均值村庄的存在对该乡镇等级影响明显。森林生态系统在长汀县 GEP 评估中扮演重要角色。今后可基于镇级尺度明确区域生态保护总体导向,基于村级尺度定位生态系统修复核心区,并加强维护森林生态系统。

3.3 生态系统服务评估与发展定位

以乡镇、村庄为研究单位,采用取最小值法对长汀县 ECC 与 GEP 进行取值,获得长汀县生态系统服务 5 个等级划分结果,将 5 个等级进行重分类,获得低、中、高 3 个生态系统服务等级镇、村及其空间分布。由图 6 可知,在评估结果中,低生态服务等级乡镇个数占比高达 38.89%;其中三洲镇等乡镇受 ECC

等级影响明显;大同镇 GEP 等级影响明显;其余乡镇则 2 个生态指标都处于低等级(表 5)。细化至 ECC 各项指标,汀州镇、三洲镇各项指标都处于中低等级;河田镇承载薄弱点在水土保持;宣成乡在生物多样性

与水土保持;羊牯乡在水源涵养、生物多样性与水土保持等方面质量等级不高;策武镇仅植被覆盖度指标等级较高,其余均偏低。可见生态系统服务影响因素复杂多样,水土保持能力对其影响显著。

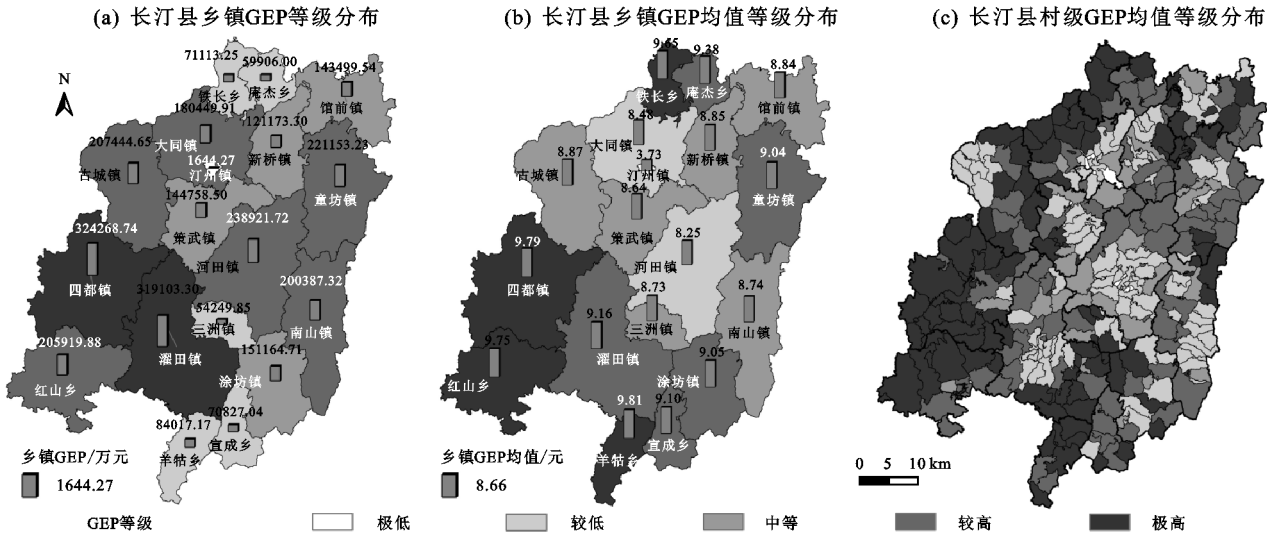


图 5 2019 年长汀县 GEP 等级空间分布

表 5 长汀县乡镇生态服务等级与发展侧重

生态服务等级	乡镇名称	ECC 等级	GEP 等级	发展侧重
低	汀州镇、河田镇	低	低	重视生态承载力与系统结构双重修复;部分经济强镇应支付一定生态维护费用
	三洲镇、策武镇	低	中	重视生态承载力优化调整;部分经济强镇应支付一定生态维护费用
	宣成乡、羊牯乡	低	高	
	大同镇	中	低	重视生态系统结构优化调整;部分经济强镇应支付一定生态维护费用
中	濯田镇、涂坊镇、红山乡	中	高	预防环境退化;强化生态承载力;适度经济开发
	南山镇、馆前镇、古城镇、新桥镇	高	中	预防环境退化;优化生态系统结构;适度经济开发
高	童坊镇、四都镇、铁长乡、庵杰乡	高	高	巩固生态成果,在生态补偿经费划分中获取最大配额;打造高品质魅力生态空间,发展绿色经济

根据乡镇尺度结果可知,长汀县生态系统整体服务功能不强,各乡镇多为中等以下水平,各等级乡镇面积占比分别为低等级 29.01%,中等级 47.99%,高等级 23.00%;中低生态服务等级乡镇片状覆盖,高等级乡镇点状分散,整体呈中部低、四周高的空间分布特征(图 6a)。根据村级尺度结果可知,各等级村庄面积占比分别为低等级 28.28%,中等级 22.16%,高等级 49.56%,高等级面积占比提升;高等级村庄分布较广,低等级村庄于几个地形平坦、人口密集区集聚分布;低等级村庄数量虽不及高等级村庄,但对乡镇尺度等级评估有更显著影响。

综上可知,长汀县生态系统较为脆弱,影响因素具有多样性和显著性特点,镇村 2 级生态系统服务评估存在差异。村级尺度研究有利于剖析区域内部的空间异质性,获取生态系统的脆弱症结;可发现更多生态系统服务高等级区域,有利于地区发展政策的精

准定位,使低、中等级乡镇中的高生态系统服务村庄获得针对性发展政策。因此,为推进国土空间优化,提升生态系统服务水平;基于乡镇尺度结果,分析不同乡镇的生态影响因素,制定不同生态系统服务等级乡镇未来发展的方向及侧重点(表 5);基于村级尺度,对不同等级村庄制定专项发展规划,着重低生态服务等级村庄的生态修复,以提升乡镇综合生态系统服务功能。

村级尺度分析可明确村域整体发展方向,却无法剖析各生态系统斑块的服务等级。综合上述评估结果可知,汀州镇作为长汀县县政府所在地,其生态系统服务各项评价指标皆处于低等级,生态系统极为脆弱。为了明确地区生态系统脆弱点,为今后微尺度区域生态治理和空间优化提供依据,研究基于汀州镇生态系统类型,进行汀州镇生态系统类型服务等级评估。由图 7 可知,汀州镇城镇化程度较高,生态系统

人为影响程度高,脆弱性强;森林生态系统服务等级高,对区域生态服务提升具有重要意义,今后应优化中心城区、人口密集区、城镇开发区等区域的绿地系统,增加植被覆盖率。

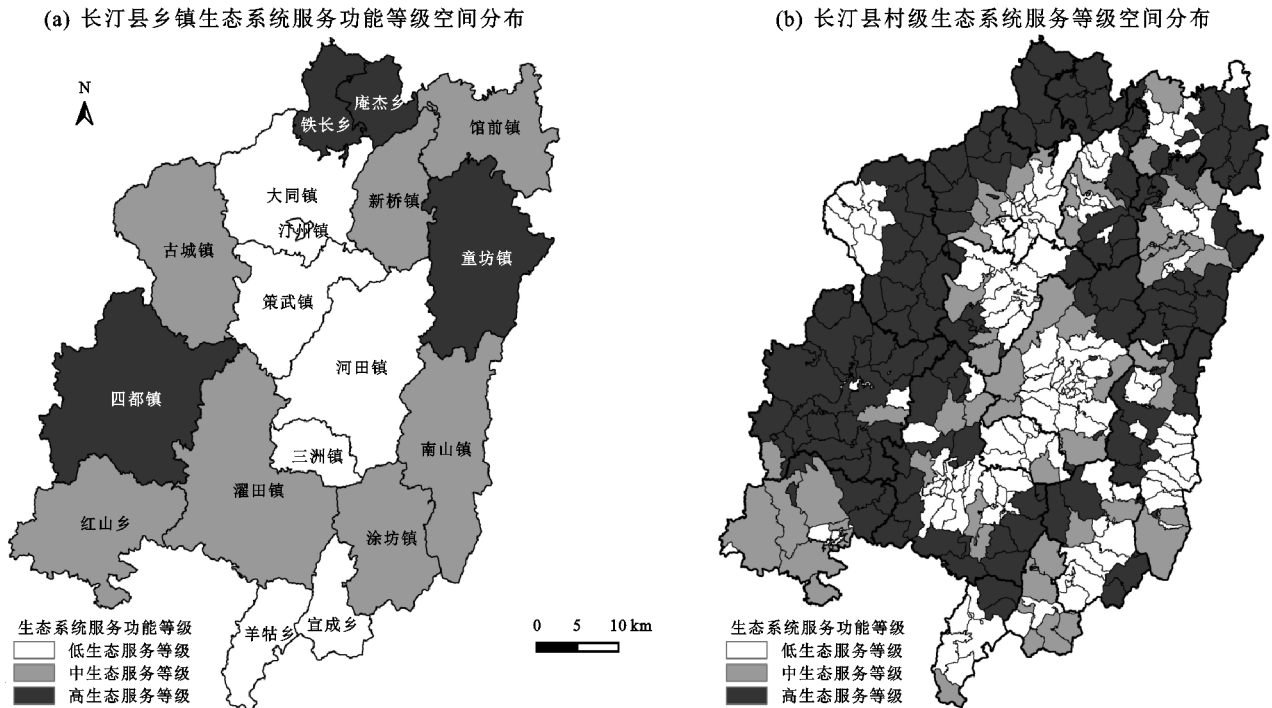


图 6 长汀县生态系统服务等级空间分布

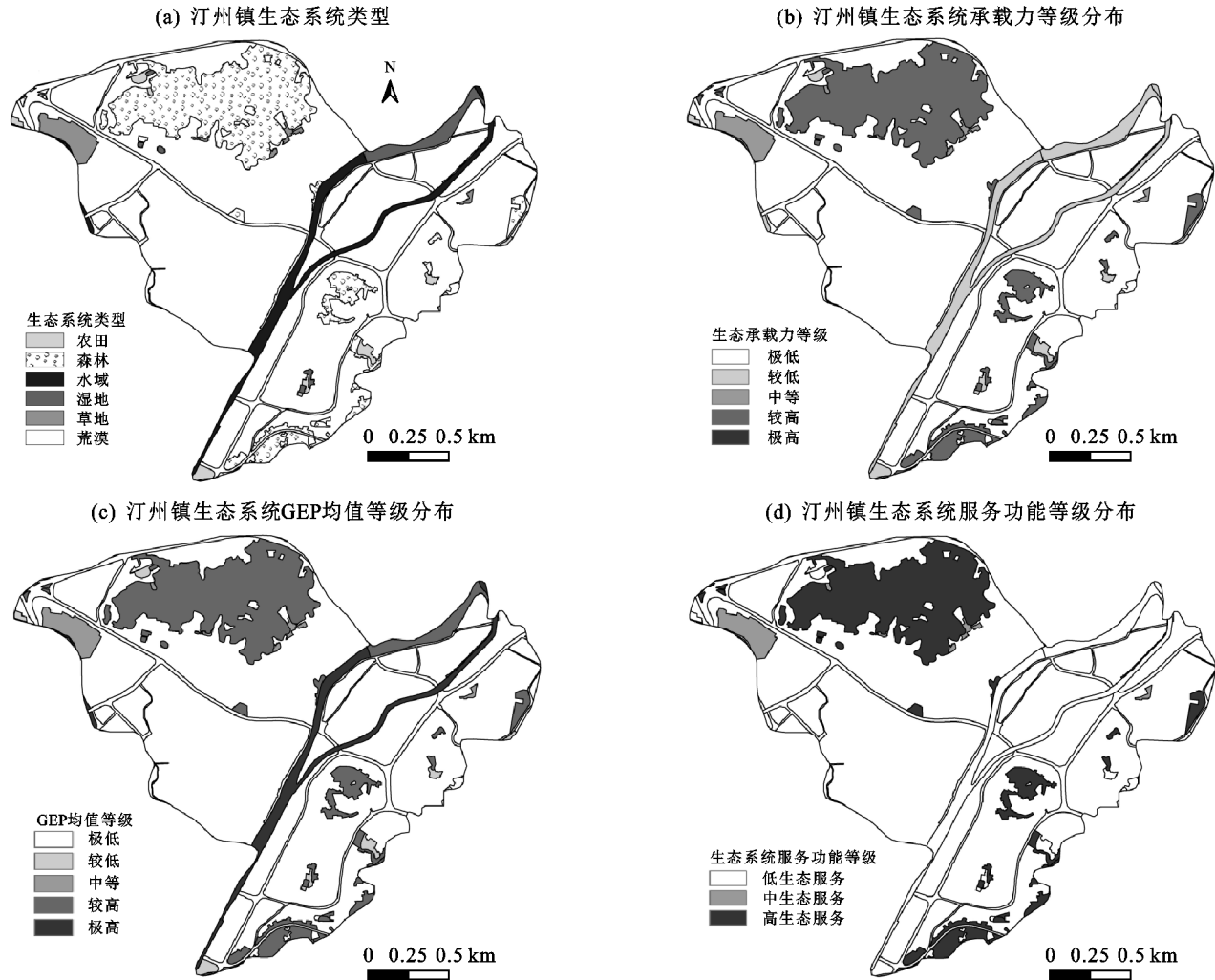


图 7 汀州镇生态系统服务功能分析

4 讨论

4.1 ECC与GEP耦合的生态系统服务评估优势

传统生态系统服务评估大多采用ECC或GEP的单一方法,无法综合反映生态系统的空间特征。本研究基于生态系统服务地理学研究范式,重视生态系统服务的区域差异性和多空间尺度的关联性,耦合ECC与GEP对生态系统服务进行空间模拟与表达,综合分析生态系统服务的空间特征^[2]。该方法包括生态系统服务承载和价值特征,又便于决策使用;将模型评估与定量指标法相结合来分析ECC,相较于生态足迹法,数据获取更便捷,可体现空间特征^[6,10];在当量因子法中引入调整系数,使GEP兼顾区域生物量差异及公众支付意愿与能力^[12]。其划分结果皆大致呈现相同或相近等级区域空间集中连片分布特征,符合地理学区域划分的基本规律。结果分析显示,长汀县生态系统服务等级空间分布与地形地势、人类活动、政策实施存在相关性^[23,26],研究方法科学合理。

4.2 生态系统服务评估成果支撑国土空间规划

现有承载力研究缺乏空间尺度转化,无法满足明确生态底线、优化资源配置、调整空间发展结构的需要^[19]。通过ECC、GEP耦合,运用最小值法划分等级,可区分生态系统服务的空间分布差异,明晰空间优化过程中生态系统的促进与限制作用^[2]。研究尺度从县域向乡镇、村庄、斑块逐层深入,可基于各尺度各单项指标、ECC、GEP均值及生态系统服务等级评估结果,为决策管理部门、空间规划编制及管理实施者提供多层次科学数据支撑。已有研究^[10]表明,精细尺度质量等级分布异质性更强,可为相关主体提供更具针对性的建议。基于生态优先理念,县、镇尺度成果可为区域发展提供总体定位,村级、斑块尺度结果可为小区域特色发展提供导向建议。

4.3 长汀县生态系统服务功能提升与空间发展优化

政府应继续重视森林保育工作,基于空间异质性,合理安排生态经费,适度增加相关费用投入。部分经济强镇应向高(低)生态服务等级乡镇支付一定生态补偿(修复)费用;高生态服务等级乡镇应在生态补偿经费划分中获取较大配额;将生态修复经费重点投入修复低等级村庄、生态系统斑块等领域。依据评估结果,对同级别生态服务等级区域的不同生态薄弱点制定针对性生态修复方案。水土流失仍是长汀县生态脆弱的关键因素,多年治理使得长汀水土治理工作进入深水区,需制定更具综合性、针对性的治理方案。依据人类活动频率,对人口稠密区进行生态空间修复织补,编制绿地系统规划,打造绿色宜居的“三

生”空间;对人口稀疏区应严守生态屏障,严审开发项目。基于区域生态服务等级,提出差异化发展策略,为各乡镇空间规划、村庄规划编制提供指导方向。低生态服务区域依据评估结果编制专项生态修复方案,注重补短板、强弱项;中生态服务区域应优化产业布局,预防生态退化,达到可持续发展目标;高生态服务区域着力打造高品质魅力生态空间,发展绿色经济,支撑长汀县可持续发展。

5 结论

生态系统质量反映区域资源本底现状,关系到区域可持续发展水平。研究以长汀县为例,耦合ECC与GEP,构建区域生态系统服务评估体系,对植被覆盖度、生态系统生产力、水源涵养、生物多样性、水土保持及生态系统类型价值等进行评价,获得区域生态系统服务等级及其空间分布特征。长汀县生态系统服务等级大致呈中间低、四周高的空间分布特征。各指标及生态系统服务等级空间分布与地形地势、人类活动、政策实施存在较强联系。森林生态系统的有效保护可有效治理水土流失,提升区域生态系统服务等级。研究方法科学合理,具有可复制性,能够摸清研究区域的国土空间生态本底特征,明确生态系统修复重点乡镇;细化区域内部空间异质性,突出村级、斑块微尺度生态脆弱症结;可为生态系统保护格局构建提供现状底图;可为县、镇、村3级国土空间开发保护的战略部署、总体布局 and 有效衔接提供支撑,提出国土空间优化导向。

参考文献:

- [1] 赵文武,刘月,冯强,等.人地系统耦合框架下的生态系统服务[J].地理科学进展,2018,37(1):139-151.
- [2] 李双成,刘金龙,张才玉,等.生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J].地理学报,2011,66(12):1618-1630.
- [3] 赵东升,郭彩霞,郑度,等.生态承载力研究进展[J].生态学报,2019,39(2):399-410.
- [4] 高敏雪.生态系统生产总值的内涵、核算框架与实施条件:统计视角下的设计与论证[J].生态学报,2020,40(2):402-415.
- [5] 中华人民共和国自然资源部.国家发展改革委自然资源部关于印发《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》的通知[EB/OL].(2020-06-03)[2020-10-13].http://gi.mnr.gov.cn/202006/t20200611_2525741.html.
- [6] 中华人民共和国生态环境部.关于印发《生态保护红线划定指南》的通知[EB/OL].(2017-5-27)[2020-6-30].http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm.
- [7] 樊杰.资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方

法指南[M].北京:科学出版社,2019.

- [8] 朱嘉伟,谢晓彤,李心慧.生态环境承载力评价研究:以河南省为例[J].生态学报,2017,37(21):7039-7047.
- [9] Chen Y Z, Lu H W, Li J, et al. Multi-criteria decision making and fairness evaluation of water ecological carrying capacity for inter-regional green development[J].Environmental Science and Pollution Research, 2020, 28(6):6470-6490.
- [10] 刘世梁,武雪,朱家蓓,等.耦合景观格局与生态系统服务的区域生态承载力评价[J].中国生态农业学报,2019,27(5):694-704.
- [11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [12] Su K, Wei D Z, Lin W X. Evaluation of ecosystem services value and its implications for policy making in China: A case study of Fujian province[J].Ecological Indicators,2020,108:e105752
- [13] Wu T X, Sang S, Wang S D, et al. Remote sensing assessment and spatiotemporal variations analysis of ecological carrying capacity in the Aral Sea Basin[J].Science of The Total Environment, 2020,735:e139562.
- [14] He Y F, Xie H L. Exploring the spatiotemporal changes of ecological carrying capacity for regional sustainable development based on GIS: A case study of Nanchang City[J].Technological Forecasting and Social Change, 2019,148:e119720.
- [15] Baniya B, Tang Q H, Pokhrel Y, et al. Vegetation dynamics and ecosystem service values changes at national and provincial scales in Nepal from 2000 to 2017[J].Environmental Development, 2019,32:e100464.
- [16] Xing L, Hu M S, Wang Y. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological

risk assessment: A case study of Hubei Province, Central China[J].Science of the Total Environment, 2020,740:e140126.

- [17] Li B Y, Wang W, Wang Y C. Identifying the relationships among multiple ecosystem services[J].Journal of Arid Environments, 2020, 183:e104265.
- [18] 白玛卓嘎,肖燚,欧阳志云,等.基于生态系统生产总值核算的习水县生态保护成效评估[J].生态学报,2020,40(2):499-509.
- [19] 郝庆,邓玲,封志明.国土空间规划中的承载力反思:概念、理论与实践[J].自然资源学报,2019,34(10):2073-2086.
- [20] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J].Science,2016,352(6292):1455-1459.
- [21] 中华人民共和国自然资源部.自然资源部办公厅关于印发《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》的函[EB/OL].(2020-1-19)[2020-6-30].http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html.
- [22] 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.
- [23] 朱治州,钟业喜.长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1520-1530.
- [24] Xie G D, Zhang C X, Zhen L, et al. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services[J].Ecosystem Services,2017,26(A):146-154.
- [25] 黄序和,李立国,中华人民共和国民政部.中华人民共和国政区大典[M].福建省卷上下册.北京:中国社会科学出版社,2016.
- [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.

(上接第 149 页)

- [16] 牛勇,汪滨,王玲,等.北京土石山区 4 种典型林分的水文效应研究[J].水土保持研究,2015,22(5):113-117,121.
- [17] 王忠诚.湖南省国家级公益林生态效益监测与评价研究[D].长沙:中南林业科技大学,2013.
- [18] 刘艳,孙向阳,范俊岗,等.辽宁省森林枯落物现存量及其持水性能[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4):689-699.
- [19] 曹云生,赵艳玲.不同灌木林分枯落物层与土壤层水源涵养能力研究[J].水土保持研究,2019,26(6):179-183.
- [20] 兰亚男,孙旭,秦富仓,等.阴山北麓不同林分类型枯落

物层持水性能研究[J].水土保持研究,2019,26(6):151-157.

- [21] 何友均,梁星云,覃林,等.南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响[J].生态学报,2013,33(8):2484-2495.
- [22] 陈伟光,张卫强,张卫华,等.南亚热带桉树林和针阔混交林土壤及凋落物持水能力比较[J].广东林业科技,2014,30(5):35-42.
- [23] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质[J].应用生态学报,2010,21(10):2479-2486.