

DOI: 10.20103/j.stxb.202406011268

高小艳, 王强, 陈田田. 喀斯特生态系统服务对农户福祉的影响跨尺度解析——以环江县为例. 生态学报, 2025, 45(5): 2225-2242.

Gao X Y, Wang Q, Chen T T. Cross-scale impact of ecosystem service on households' well-being in karst regions: a case study of Huanjiang County. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2225-2242.

喀斯特生态系统服务对农户福祉的影响跨尺度解析 ——以环江县为例

高小艳^{1,2}, 王 强^{3,4}, 陈田田^{1,2,*}

1 重庆师范大学三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331

2 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331

3 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045

4 重庆市规划和自然资源调查监测院, 重庆 401121

摘要:最大化发挥生态系统服务在促进农户福祉中的作用,同时确保生态功能定位,是实现喀斯特地区可持续发展的关键。目前关于生态系统服务对农户福祉影响的研究,多集中于宏观或微观单一尺度上,较少关注其跨尺度关联效应,导致对农户福祉影响机制的片面理解,并限制了政策制定的有效性。为此,以典型喀斯特区——环江县为例,基于估算的生态系统服务及 677 名农户调研数据,构建农户-乡村双层线性模型,明晰区域宏观生态系统服务、农户福祉时空特征,解析生态系统服务对农户福祉跨尺度直接和间接影响,并针对性提出优化对策。结果显示:(1)2012—2020 年环江县生态系统服务整体呈上升趋势,空间分布异质性明显;农户福祉均值为 3.51,其中,安全福祉得分最高(4.30),收入福祉得分最低(2.68),空间上呈西南高、东北低的分布格局。(2)个体特征中的年龄、受教育程度、曾是否为贫困户对农户福祉具有显著影响;村域层面粮食生产、科学教育和空气净化功能的提升会直接增强农户福祉,且空气净化的作用更明显,表明农户对物质需求的满足和对高层次需求的追求。(3)固碳会对受教育程度、年龄等个体特征施加影响,进而对农户福祉产生正向的跨尺度关联效应,突显了生态修复政策的重要作用;而粮食生产会对年龄施加影响,进而对农户福祉产生负向调节作用,揭示了农村年轻劳动力不足和空心化等区域性社会问题;与供给、文化服务相比,调节服务对区域农户福祉提升的跨尺度间接作用更显著。在生态脆弱的喀斯特地区,应重点关注和改善关键调节服务,制定有效措施缓解农村人口流失和农户文化水平低的问题,以实现生态系统服务福祉效应最优和区域高质量发展。

关键词:生态系统服务;农户福祉;跨尺度关联;双层线性回归;环江县

Cross-scale impact of ecosystem service on households' well-being in karst regions: a case study of Huanjiang County

GAO Xiaoyan^{1,2}, WANG Qiang^{3,4}, CHEN Tiantian^{1,2,*}

1 Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 Chongqing Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

3 School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

4 Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 401121, China

Abstract: Maximizing the role of ecosystem services in promoting household well-being, as well as ensuring ecological function positioning, is the key to achieving sustainable development in karst regions. Current studies on the effect of

基金项目:教育部人文社科项目(24YJCZH025);重庆师范大学“博望学者”计划(BWQB2023017);重庆市自然科学基金(2024NSCQ-MSX3043);重庆市教委人文社科规划项目(24SKGH075)

收稿日期:2024-06-01; 采用日期:2025-01-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chentiantian@cqnu.edu.cn

ecosystem services on household well-being mainly focus on either macro or micro single scales, with limited attention given to their cross-scale associative effects, causing a one-sided understanding of the complex impact mechanism on household well-being and the limitations in policy-making. In this study, taking a typical karst region of Huanjiang County as an example, we constructed a household-village hierarchical linear model based on estimated ecosystem services and survey data from 677 households, clarified the spatiotemporal characteristics of regional macro-level ecosystem services and household well-being, analyzed the cross-scale direct and indirect impacts of ecosystem services on household well-being, and propose targeted optimization strategies. The results indicated that (1) From 2012 to 2020, ecosystem services in Huanjiang County showed an overall increasing trend and significant spatial heterogeneity. The average score of household well-being was 3.51, with safety well-being scoring the highest at 4.30 and income well-being obtaining the lowest score at 2.68; spatially, the regions with high household well-being were distributed in the southwestern of the study area, while regions with low household well-being were concentrated in the northeastern regions. (2) Individual characteristics such as age, education level, and previous experience in a poverty-stricken household, significantly impacted household well-being. At the village level, improvements in food production, scientific education, and air purification would directly enhance household well-being, and air purification had a more pronounced role, showing the satisfaction of material needs and the pursuit of high-level needs for households. (3) Carbon sequestration showed an impact on individual characteristics such as education level and age, thereby generating a positive cross-scale correlation effect on household well-being, emphasizing the critical importance of ecological restoration policies; food production exerted an influence on age, thereby generating a negative regulatory effect on household well-being, revealing regional social issues such as insufficient young labor force and hollowing out. Compared to provisioning and cultural services, regulating services exerted a more significant cross-scale indirect effect on enhancing regional household well-being. In ecologically fragile karst regions, there should be a focus on improving critical regulating services, and effective measures need to be carefully formulated to alleviate the issue of rural depopulation and low education level, and then optimize the welfare effect of ecosystem services and achieve regional high-quality development.

Key Words: ecosystem service; households' well-being; cross-scale correlation; hierarchical linear model; huanjiang county

生态系统服务是指自然生态系统以及物种所提供的能够满足和维持人类生活需要的条件和过程,是人类直接或间接从生态系统中获得的各种惠益^[1],对人类福祉实现具有重要意义。2005年,自联合国千年生态系统评估报告中首次提出了生态系统服务与人类福祉的“服务-功能-福祉”这一基本范式后^[2],生态系统服务对人类福祉的影响已成为了生态学、地理学等学科研究的热点^[3],对实现区域社会-生态系统高质量发展具有重要价值。

目前,关于生态系统服务对福祉影响的研究主要集中于宏观与微观两个尺度。在宏观尺度,主要利用生态过程模型^[4]、生态足迹^[5]、价值当量^[6]等方法估算生态系统服务价值量或功能;以人类发展指数、国家福祉指数及其他常用指标如人均收入、住房面积等来评价福祉^[7];通过相关性分析^[8]、灰色关联模型^[9]、地理探测器^[10]等数理统计或空间分析模型识别生态系统服务对福祉的影响。在微观尺度,大多使用问卷调查^[11]、参与式评估^[12]等方法,透过农户主观感知、环境收入水平以及对生态系统的依赖度等多维指标,来衡量生态系统服务实际消费和满足度;基于千年生态系统评估框架的五个维度或相关变形框架,将客观与主观相结合构建农户福祉评价指标体系^[13];通过结构方程模型^[14]、回归分析^[15]等探讨微观尺度生态系统服务对农户福祉的影响。这些研究厘清了生态系统服务对福祉影响的内在逻辑,为后续相关研究提供了重要参考。但不难发现,这些研究多侧重于单一层面,鲜有考虑生态系统服务与福祉间的跨尺度影响,即宏观生态系统服务不仅直接影响农户福祉,还通过微观个体社会经济特征对农户福祉产生间接影响;同时,相关研究主要集中于黄土高

原^[12]和西北地区^[16],或基于草原^[17]、湿地^[18]、林地^[19]等特定生态系统,对喀斯特生态系统的关注相对不足。

喀斯特地区不仅是生态系统保护的重点地区和生态系统服务供给的关键区域,也是人地关系复杂、矛盾突出的特殊区域,在喀斯特地区寻求生态系统服务与农户福祉的协同效应已成为我国广泛关注的科学议题。然而,由于区域生态修复方式的单一性以及对于林草地面积扩大的过分追求,造成了区域耕地面积减少及粮食安全危机^[20]、加剧了社会不平等、刺激了区域规模性返贫问题^[21],导致了生态系统服务与农户福祉的权衡,严重制约了喀斯特地区的高质量发展。为破解这一难题,必须打破传统的生态系统服务、农户福祉“荒野孤岛”概念,在保障喀斯特生态功能定位的基础上,最大程度发挥生态系统服务对农户福祉的促进作用,即实现生态系统服务福祉效应最优。而厘清宏观生态系统服务对农户福祉的影响路径、强度是实现这一目标的基础环节。基于此,本文选取生态保护、经济发展与少数民族文化传承间存在尖锐矛盾的喀斯特区—环江县为案例区,在对区域粮食生产、土壤保持、产水、空气净化、固碳、科学教育等6类生态系统服务进行量化的基础上,通过参与式访谈调查获得农户个体社会经济特征和福祉,借助多层线性回归模型,剖析区域宏观生态系统服务供给对农户福祉的跨尺度影响强度及关联路径,以期为实现区域生态效益最优和微观需求满足“双赢”提供科学参考。

1 研究理论与假设

借鉴相关研究^[22—23],结合区域实际从直接和间接两方面构建了生态系统服务福祉效应的理论分析框架(图1)。直接效应包括个体社会经济特征及生态系统服务对农户福祉的直接影响。农户,作为链接生态系统服务和福祉的基本单元,个体社会经济特征会影响其福祉感知,形成显著的异质性特征。其中,性别差异造就了社会职能属性的不同^[24],影响福祉感知;不同年龄受访者因生活条件、思想观念等代际差异存在明显的福祉感知偏差^[23];农户受教育程度越高、身心状态越好,其在福祉感知上的认同度更强^[14];婚姻状况会造成个体归属感与安全感差异^[25],进而影响个体福祉水平。考虑到环江县曾属于集中连片特困区这一特点,将曾是否为贫困户纳入影响农户福祉的个体因素。基于上述分析,提出假设1:个体社会经济特征(H1)对农户福祉具有显著影响,分假设包括性别(H1a)、年龄(H1b)、受教育程度(H1c)、婚姻(H1d)、曾是否为贫困户(H1e)对农户福祉具有显著影响。同时,从生态系统服务的定义可知,其是指人类直接或间接从生态系统中获得的收益,对提升农户福祉具有重要作用。其中,粮食、水资源的供给一定程度上确保了当地农户的基本物质需求^[26];固碳和空气净化等服务在改善生态环境的同时为保障农户身心健康提供了重要途径^[27];土壤保持服务为区域生产、生活提供了必备的土地资源;科学教育服务通过提升农户受教育程度进而影响其就业和收入状况^[28]。基于以上分析,提出假设2:生态系统服务(H2)对农户福祉提升具有显著正向作用,分假设包括粮食生产(H2a)、土壤保持(H2b)、产水(H2c)、固碳(H2d)、空气净化(H2e)、科学教育(H2f)对农户福祉具有显著正向影响。

实际上,宏观生态系统服务供给不一定能同时满足不同个体对生态系统服务的偏好或依赖,甚至可能存在供需偏差,而不同个体生态系统服务的满足差异会影响其生计,造成福祉的异质性特征^[13]。为此,在明晰不同个体社会经济特征、生态系统服务对农户福祉的直接影响后,进一步探讨生态系统服务通过调节个体社会经济特征进而对农户福祉产生的间接影响,并提出假设3:生态系统服务通过个体社会经济特征(H3)对农户福祉具有正向的跨尺度调节作用。分假设包括粮食生产(H3a)、土壤保持(H3b)、产水(H3c)、固碳(H3d)、空气净化(H3e)、科学教育(H3f)通过个体社会经济特征对农户福祉具有正向的跨尺度调节作用。

2 研究区概况

环江县位于广西壮族自治区西北部(107°51′—108°43′E, 24°44′—25°33′N),是全国唯一的毛南族自治县,全县总面积为4572km²(图2),下辖1个街道、6个镇和6个乡,地处云贵高原东南麓与桂中岩溶平原过渡的斜坡地带,地势表现为北高南低^[29]。该区域年降水量约为1530—1820 mm,年均温为19.6—21.6℃^[30],属

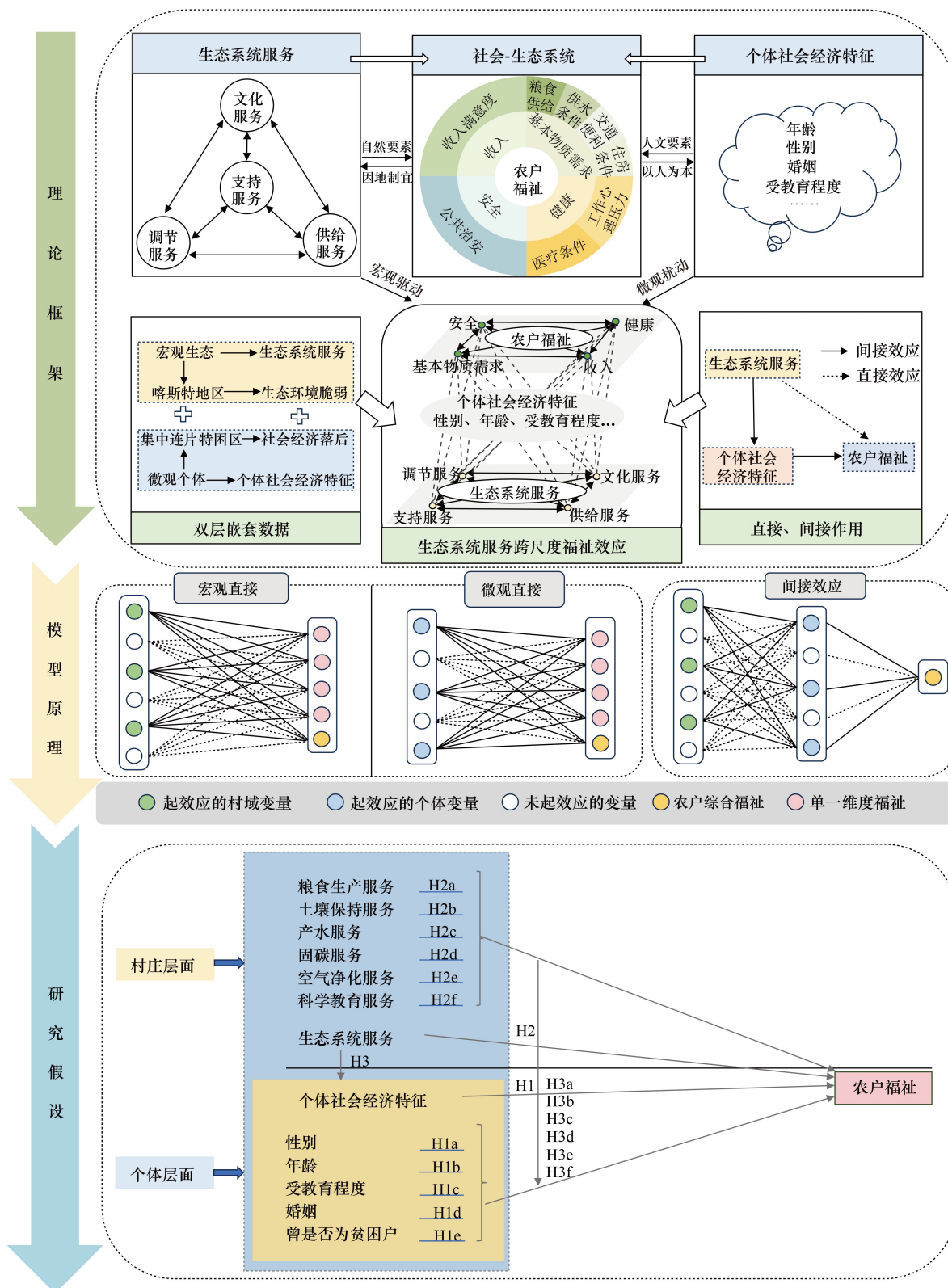


图 1 研究理论与假设框架

Fig.1 Research theory and hypothesis framework

H3a: 粮食生产, H3b: 水土保持, H3c: 产水, H3d: 固碳, H3e: 空气净化, H3f: 科学教育

于典型的亚热带季风气候,植被类型丰富,水资源充足。受岩性、地质构造的控制,区域地貌类型复杂多样,土层较薄,岩石出露率高,岩溶面积占全县面积的 72.2%^[31],石漠化治理任务艰巨、生态环境敏感且脆弱。同时,该区域也曾是国家级贫困县和广西深度贫困县之一(2020 年 5 月全县正式退出贫困县序列)。社会经济较落后,人地矛盾突出,给本就脆弱的生态环境带来巨大威胁。为此,区域实施了以石漠化治理、退耕还林还草在内的一系列生态修复措施,旨在提升区域生态系统供给能力的同时实现脱贫攻坚的“双赢”。

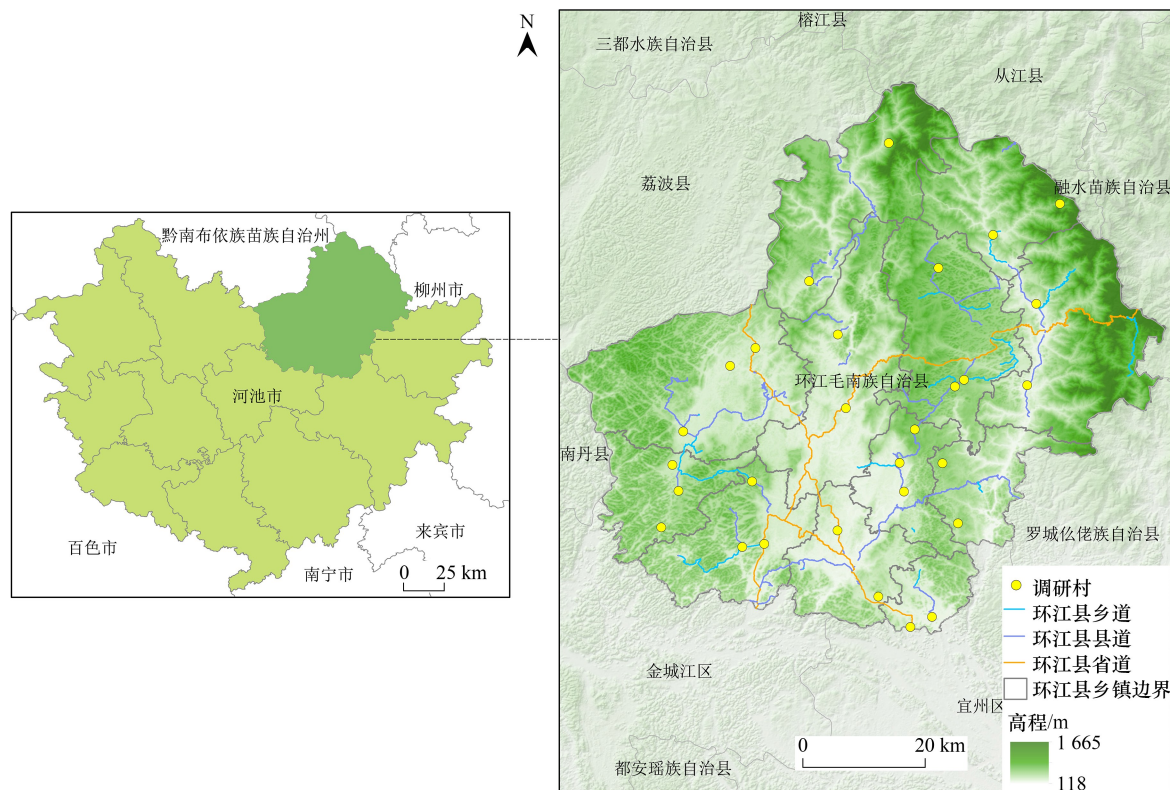


图 2 研究区地理位置

Fig.2 Location of the study area

3 数据来源与评估方法

3.1 数据来源

本文所涉数据主要包括个体变量和村域变量数据。在个体层面,采用面对面访谈的方法获得了个体社会经济特征和农户福祉感知数据。具体而言,将环江县依据乡镇分为 12 个区域,每个区域选取 2 至 3 个村庄,共计 29 个村庄,于 2023 年 8 月期间收集了 689 份调查问卷,剔除信息不完整问卷后,最终有效问卷为 677 份,回复率为 98.3%。统计结果显示(表 1),受访对象以男性为主(416 人),占总样本的 61.40%;年龄层次主要集中在 40—59 岁,占总样本的 60.70%;曾是贫困户人数为 275,占总样本的 40.60%;曾不是贫困户人数为 402,占总样本的 59.40%;仅有 4.70%的受访农户没有接受过教育,大多数受访者具有小学和初中教育水平,确保了农户对问题的把握和理解。通过 SPSS 软件对问卷信效度进行检验发现,生态系统服务满意度、重要性量表的 Cronbach's α 系数分别为 0.725 和 0.782;KMO 值分别为 0.783 和 0.823, Bartlett 球形检验显著性水平均小于 0.05,表明问卷具有较高的信效度。

在村域层面,通过重采样将数据的空间分辨率统一为 30 m、坐标系统设置为 GCS_WGS_1984(表 2)。

3.2 变量选取

村域变量:基于千年生态系统评估框架,同时将农户的生态系统服务重要性认知以打分形式量化(1—

10 分),得分越高该服务对农户福祉影响越大,最终选取土壤保持、粮食生产、产水、空气质量、固碳、科学教育 6 类关键服务用以表征环江县宏观生态系统服务供给能力;在此基础上,结合农户日常出行距离及“3 公里土地托管服务圈”理念,将农户居住地周围 3 公里范围内的生态系统服务平均值作为该农户所处的生态系统服务供给水平。

表 1 环江县受访居民的特征

Table 1 Characteristics of the surveyed residents in Huanjiang County

社会经济特征 Socioeconomic characteristics	类型 Category	数量 Number	比例/% Proportion	社会经济特征 Socioeconomic characteristics	类型 Category	数量 Number	比例/% Proportion
性别 Gender	男	416	61.40	曾是否贫困户	是	275	40.60
	女	261	38.60	Previous experience as a	否	402	59.40
年龄 Age	<30	33	4.90	poverty-stricken household	无	32	4.70
	30—39	88	13.00	受教育程度	小学	283	41.80
	40—49	173	25.60	Education level	初中	244	36.00
	50—59	238	35.10		高中及中专	83	12.30
	≥60	145	21.40		大专以上	35	5.20
				婚姻	是	611	90.30
				Marriage	否	66	9.70

表 2 村域变量数据来源

Table 2 Source of village variable data

数据类型 Data type	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data sources
净初级生产力 Net primary productivity (NPP)	500 m	MODIS 17 数据集 (https://www.ntsg.umd.edu/project/modis/)
降水数据 Precipitation data	1 km	青藏高原数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)
高程 Elevation	30 m	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)
归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	30 m	国家生态科学数据中心 (http://www.nesdc.org.cn/)
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration data	1 km	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)
PM _{2.5} 数据 PM _{2.5} data	1 km	中国高空气污染物 (CHAP) 数据集 (https://zenodo.org/record/6398971)
土地利用 Land use data	30 m	中国年度土地覆盖数据集 (http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809)
土壤数据 Soil data	—	世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database)
兴趣点 Point of interest (POI)	—	高德地图
粮食产量数据 Grain yield data	—	环江毛南族自治县国民经济和社会发展统计公报

个体变量:通过问卷访谈记录受访者的基本社会经济特征,包括性别、年龄、受教育程度、婚否和曾是否为贫困户。根据环江县实际情况,以粮食供给、供水条件、交通便利、住房条件表征高质量生活的基本物质需求福祉;以工作心理压力、医疗条件表征健康福祉;安全与收入福祉分别以公共治安和收入满意度进行表征。调研中对 8 个指标的满意度采用李克特量表将其分为非常不满意、不满意、一般、满意和非常满意,通过 1—5 的打分来进行量化。

3.3 生态系统服务估算

(1) 粮食生产

粮食生产是维持人类基本生存需要的一类生态系统服务,刘立程等^[32]的研究表明农作物、畜牧产品、淡水产品与 NDVI 间存在显著的线性关系,结合环江县粮食产出情况,依据环江县 NDVI 的空间分布,实现粮食生产服务的空间化表达,公式如下:

$$G_i = G_{\text{food}} \times \frac{\text{NDVI}_i}{\text{NDVI}_{\text{sum}}} \quad (1)$$

$$G_{\text{food}} = G_{\text{crop}} + G_{\text{grass}} + G_{\text{water}} \quad (2)$$

式中, G_i 为 i 栅格的粮食生产服务供给量; NDVI_i 为 i 栅格的归一化植被指数; NDVI_{sum} 为环江县耕地、草地和水域的 NDVI 值之和; G_{food} 、 G_{crop} 、 G_{grass} 、 G_{water} 分别表示区域内粮食生产总量、耕地、草地和水域的食物供给量。

(2) 土壤保持

土壤保持服务反映了生态系统防止土壤侵蚀、储留保持泥沙的能力。使用 InVEST 模型中泥沙输移比模块计算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之间的差值表征土壤保持服务的供给量, 公式如下:

$$\text{SEDRET}_x = \text{RKLS}_x - \text{USLE}_x \quad (3)$$

$$\text{RKLS}_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (4)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (5)$$

$$R_x = 0.0534 \times p^{1.6548} \quad (6)$$

$$K_x = (-0.01383 + 0.51575 K_{\text{EPIC}}) \times 0.1317 \quad (7)$$

$$K_{\text{EPIC}} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7\text{SNI}}{\text{SNI} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SNI})} \right] \quad (8)$$

$$\text{SNI} = 1 - \frac{\text{SAN}}{100} \quad (9)$$

式中, SEDRET_x 为栅格 x 的土壤保持量 (t/hm^2); RKLS_x 、 USLE_x 分别为栅格 x 的潜在土壤侵蚀量 (t/hm^2) 和实际土壤侵蚀量 (t/hm^2); P_x 为水土保持措施因子、 C_x 为植被覆盖管理因子、 R_x 为降雨侵蚀力因子、 LS_x 为地形因子、 K_x 为土壤可蚀性因子、 P 为年降雨量 (mm); SAN 为砂粒含量 (%); SIL 为粉粒含量 (%); CLA 为黏粒含量 (%); C 为有机碳含量 (%)。

(3) 产水

根据水量平衡原理, 利用 InVEST 模型中的产水模块计算生态系统服务的水资源供给量。即区域降水量与实际蒸散发量之间的差值估算区域产水量, 公式如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{\text{AET}_x}{P_x} \right) \times P_x \quad (10)$$

式中, Y_x 为研究区栅格单元 x 的年产水量 (mm); P_x 为研究区栅格单元 x 的年降水量 (mm); AET_x 为栅格 x 的年实际蒸发量 (mm)。

(4) 科学教育

使用最新高德地图平台作为基础数据源, 爬取环江县区域范围内与科学教育服务相关的兴趣点 (学校、博物馆、文化宫) 数据, 借助兴趣点数量及其经纬度信息, 进行核密度分析, 从而得出研究区科学教育服务的空间分布特征, 公式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{nh} k \left(\frac{x - x_i}{h} \right) \quad (11)$$

式中, $f(x)$ 为空间位置 x 处点数据的核密度计算函数; k 函数表示空间权重函数, 也被称为核函数; h 为距离衰减阈值, 表示核函数带宽; n 为带宽范围内位置点的数量; $(x - x_i)$ 表示密度估计值点 x 到样本点 x_i 的距离。

(5) 固碳

植被净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 是绿色植物在单位时间、单位面积内所累积的有机物总量, 可作为表征陆地生态系统固碳能力的关键指标, 在维持水、碳平衡过程中具有重要作用^[33]。为此, 以 NPP 来表征环江县生态系统固碳能力大小。

(6) 空气净化

细微颗粒物($PM_{2.5}$)是大气污染的主要来源,植物叶片表面、枝条、皮孔等可以吸附捕获大气颗粒物,在维护生态系统功能,改善空气质量上发挥着重要作用。基于孟欣宇等^[34]的研究,使用 $PM_{2.5}$ 含量表征区域空气净化服务, $PM_{2.5}$ 含量越高说明空气净化能力越弱,反之则越强。

3.4 农户福祉

本文根据 Wang 等^[35]提出的方法,基于四类福祉满意度和重要性量表将得分量化处理后,通过加权求和的方式得到农户综合福祉,公式如下:

$$SWB = \sum_{i=1}^4 w_i WB_i \quad (12)$$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n I_{ij}}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n I_{ij}} \quad (13)$$

$$WB_i = \frac{\sum_{j=1}^n I_{ij} S_{ij}}{\sum_{j=1}^n I_{ij}} \quad (14)$$

式中,SWB 表示农户综合福祉得分; w_i 是第 i 类福祉的权重; WB_i 是第 i 类福祉的得分。 I_{ij} 、 S_{ij} 分别为指标 j 和 i 类型福祉的重要性和满意度得分。权重 w_i 根据 8 项福祉指标的重要性得分厘定。

3.5 多层线性模型

多层线性模型(Hierarchical Linear Modeling, HLM)是同时考虑个体和总体因素,精确计算不同层级要素对因变量贡献程度的统计方法^[36]。本文构建了农户-乡村嵌套的双层线性模型以探讨生态系统服务对农户福祉的影响机制。其具体过程如下:

首先,运行空模型(模型 I),其是多层线性模型建立的基础,不包含任何自变量;且只有当该模型的组内相关性通过显著性检验后才能进行后续建模分析。其运行公式如下:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + r_{ij} \quad (15)$$

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \mu_{0j} \quad (16)$$

式中, Y_{ij} 是农户福祉, i 表示个体层的指数, j 表示村域层的指数; β_{0j} 是个体层的随机截距; γ_{00} 为随机截距的总平均截距; r_{ij} 为个体层的残差; μ_{0j} 为村域层的残差。

基于空模型,计算出组内相关系数(Intraclass Correlation Coefficient, ICC)可用于揭示后续建模分析的必要性和各层次方差占总方差的比例^[22],计算公式如下:

$$ICC = \frac{\tau_{00}}{\tau_{00} + \sigma^2} \quad (17)$$

式中,ICC 指组内相关系数, τ_{00} 指组间方差、 σ^2 指组内方差。

在空模型的基础上加入个体变量,建立随机系数回归模型(模型 II),运行公式如下:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} X_{ij} + r_{ij} \quad (18)$$

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \mu_{0j} \quad (19)$$

在空模型基础上加入村域变量,建立截距模型(模型 III),运行公式如下:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + r_{ij} \quad (20)$$

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01} E_j + \mu_{0j} \quad (21)$$

结合本研究理论框架,第一层面按照组均值中心化加入个体变量,第二层面按照总体均值中心化加入村域变量,建立完整模型(模型 IV),运行公式如下:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j}X_{ij} + r_{ij} \quad (22)$$

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01}E_j + \mu_{0j} \quad (23)$$

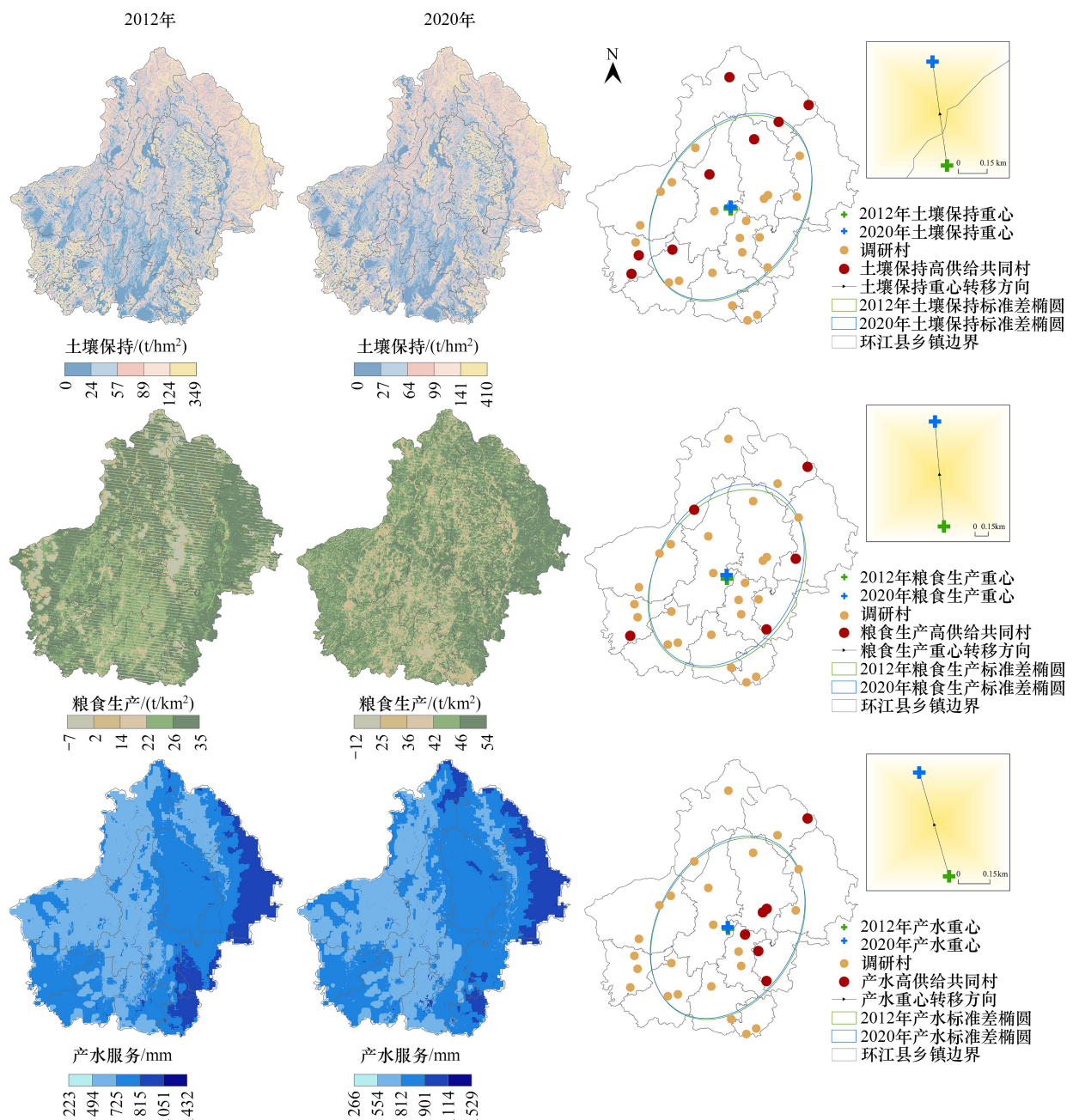
$$\beta_{1j} = \gamma_{10} + \gamma_{11}E_j + \mu_{1j} \quad (24)$$

式中,其中 X_{ij} 表示个体社会经济特征; β_{0j} 、 β_{1j} 为个体层的随机截距和随机斜率; r_{ij} 表示个体层的残差; E_j 表示村域生态系统服务; γ_{00} 、 γ_{01} 、 γ_{10} 、 γ_{11} 分别为村域层随机截距的总平均截距、随机截距的斜率、随机斜率的截距、随机斜率的斜率; μ_{0j} 和 μ_{1j} 分别表示村域层随机截距和随机斜率的残差。

4 结果与分析

4.1 生态系统服务时空变化特征

2012—2020 年,各类服务供给能力均呈现出了上升趋势,且空间分布异质性明显(图 3)。其中,土壤保持均值由 58 t/hm^2 增加到了 66 t/hm^2 ,高值区主要分布于研究区东北部,低值区主要集中在西南部;粮食生产



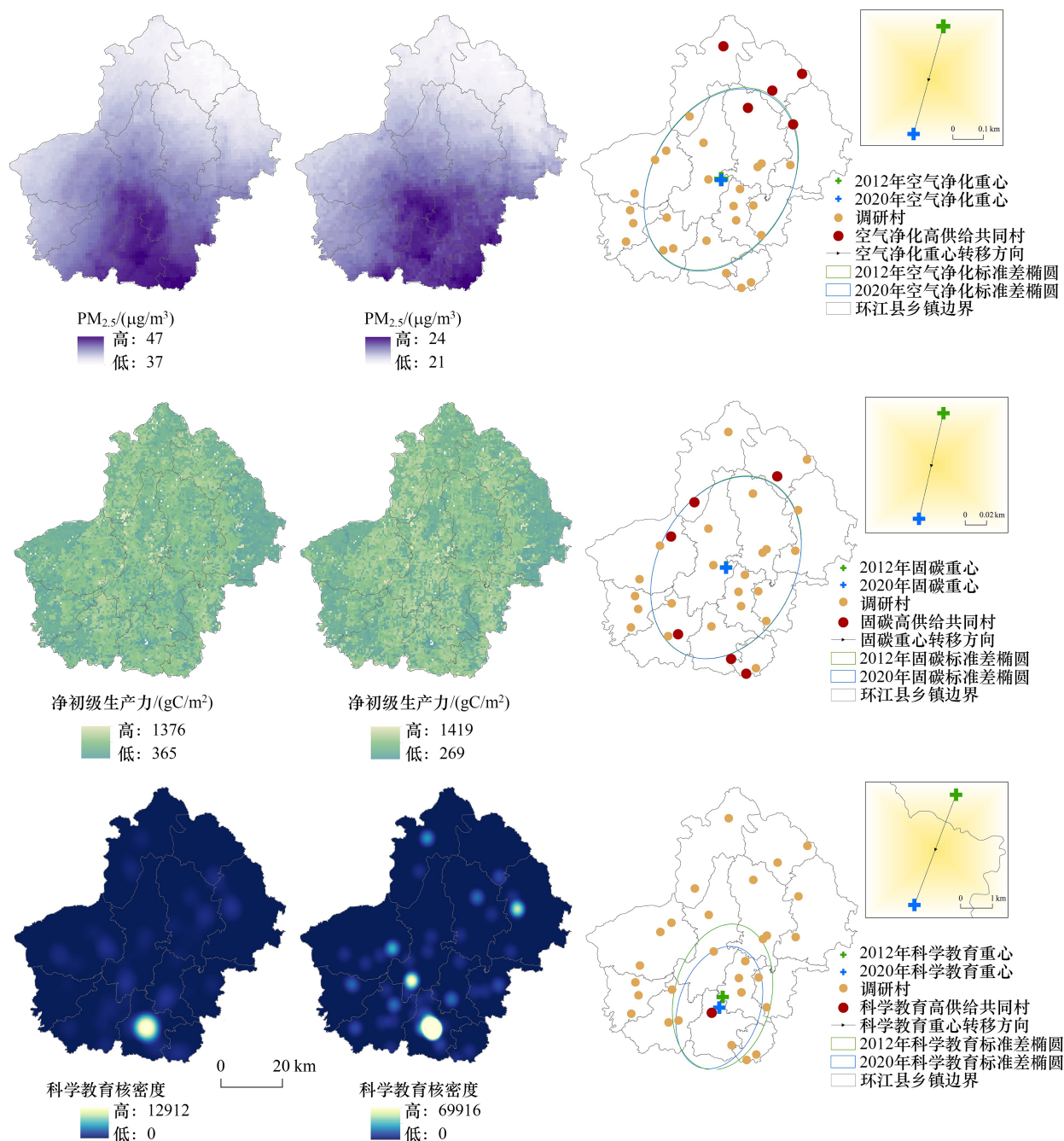


图3 2012年与2020年六种生态系统服务空间分布及重心时空迁移特征与空间分布方向性趋势

Fig.3 Spatial distribution of six kinds of ecosystem services in 2012 and 2020, characteristics of spatial and temporal migration of center of gravity and directional trend of spatial distribution

均值由 19 t/km^2 增加到了 42 t/km^2 , 高值区主要分布于研究区东北部的边缘地带; 产水量均值由 745 mm 增加到了 833 mm , 高值区主要分布于研究区东北部, 低值区主要集中在西南部; $\text{PM}_{2.5}$ 均值由 $41 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 下降到了 $22 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 呈现出了南高北低的分布格局; NPP 均值由 828 gC/m^2 增加到了 883 gC/m^2 , 总体上呈中心至外围递减的分布趋势; 科学教育设施数量由 119 个增长到了 178 个, 形成了以思恩镇为核心的“高集聚-低分散”的空间分布形态。就各类服务的供给分布及重心转移而言, 水土保持、粮食生产、产水、空气净化、固碳整体均呈东北-西南走向, 其中, 水土保持、粮食生产、产水重心均呈现出了向西北方向转移的特点; 空气净化、固碳重心略向西南方向转移。科学教育的分布格局变化最大, 围绕中心乡镇收缩明显, 标准差椭圆旋转角由 2012 年

的 19.56°上升到了 2020 年的 24.76°,重心呈现出了向西南方向转移的特征。

4.2 农户福祉水平及其差异

环江县农户综合福祉为 3.51,在四种福祉类型中,安全和基本物质需求福祉得分较高,分别为 4.30 和 3.66;收入福祉得分最低,为 2.68(图 4)。通过分析农户对各评价指标的满意度可以发现,公共治安和交通条件 2 个指标的分值较高,分别为 4.30 和 4.11,各高于农户综合福祉得分 0.79 和 0.60;而粮食和收入指标分值较低,分别为 3.01 和 2.68,各低于农户综合福祉得分 0.50 和 0.83。

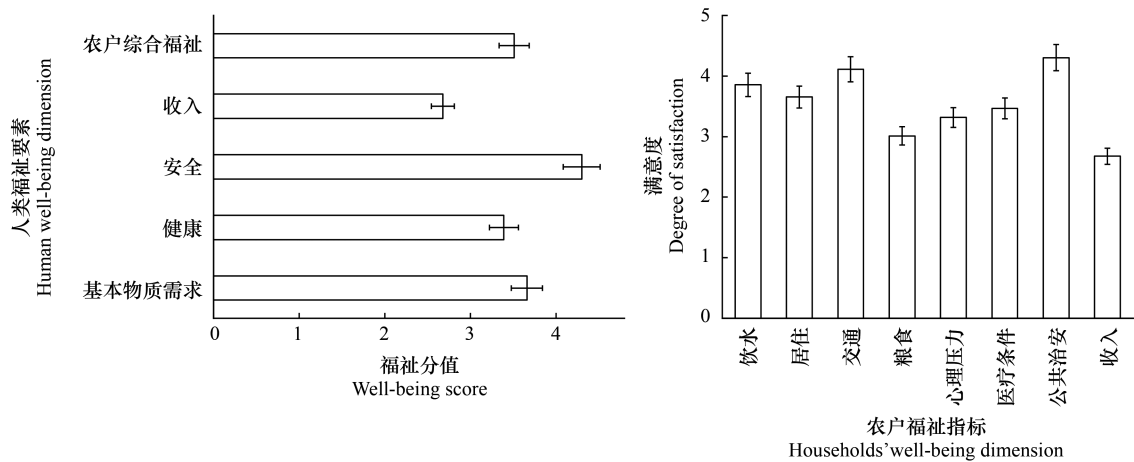


图 4 环江县各类福祉分值和福祉指标满意度分值

Fig.4 The values of well-being in Huanjiang County and satisfaction scores of welfare indicators

基于自然断点法将研究区不同类型福祉进行分级发现,不同福祉类型的空间分布差异性明显(图 5)。其中,农户综合福祉呈现出了西南高东北低的分布特征;基本物质需求福祉的分布较均衡,呈“高且密”的分布格局;健康福祉的分布较集中;安全福祉以中等水平为主,高等级村庄数量少且分散;收入福祉呈现以中心乡镇为中心向外辐射递减的分布格局。值得注意的是,下久村、何顿村和朝阁村在单一维度福祉和农户综合福祉中的等级均较低,需重点关注。

量化农户福祉后,本文采用 Kruskal-Wallis 检验,进一步分析了不同个体社会经济特征的福祉差异。结果表明,除婚姻状况与农户福祉不存在显著相关性外,性别、曾是否为贫困户、年龄、受教育程度等与农户福祉都具有显著相关性($P<0.05$),且组间差异明显(表 3)。其中,男性的农户综合福祉均值为 3.59,高于女性(3.48),且以基本物质需求、安全福祉的得分差异最明显;曾是贫困户的农户综合福祉均值为 3.62,高于曾不是贫困户的农户(3.49),主要表现为基本物质需求和健康福祉上的差异;除安全福祉外,不同年龄段的农户在多维福祉和综合福祉上均呈现出了显著差异,且 30 岁以下和 60 以上福祉水平均高于 30—59 岁农户;对于不同文化程度农户,高中及中专学历农户的健康福祉和综合福祉最高,大专及以上学历农户的收入福祉最高。

表 3 环江县不同社会经济特征受访者农户福祉差异

Table 3 Differences in household well-being among respondents with different socioeconomic characteristics in Huanjiang County

社会经济特征 Socioeconomic characteristics	类型 Category	基本物质需求 Basic material demand	健康 Health	安全 Security	收入 Income	综合福祉 Composite well-being
性别 Gender	男性	3.72	3.38	4.36	2.69	3.59
	女性	3.55	3.40	4.21	2.65	3.48
	χ^2	13.18 ***	0.03	9.99 ***	0.08	4.94 **
曾是否为贫困户 Previous experience as a poverty-stricken household	是	3.72	3.53	4.30	2.75	3.62
	否	3.61	3.29	4.31	2.62	3.49
	χ^2	2.91 *	9.41 ***	0.06	2.63	5.32 **

续表

社会经济特征 Socioeconomic characteristics	类型 Category	基本物质需求 Basic material demand	健康 Health	安全 Security	收入 Income	综合福祉 Composite well-being
婚姻 Marriage	是	3.65	3.38	4.30	2.68	3.54
	否	3.67	3.46	4.29	2.65	3.57
	χ^2	0.49	0.57	0.36	0.01	1.00
年龄 Age	<30	3.73	3.56	4.58	2.97	3.70
	30–39	3.51	3.18	4.26	2.60	3.41
	40–49	3.64	3.30	4.27	2.56	3.50
	50–59	3.62	3.35	4.29	2.60	3.50
	≥ 60	3.81	3.65	4.33	2.91	3.73
受教育程度 Education level	χ^2	13.68***	20.16***	4.85	10.20**	21.43***
	无	3.54	3.12	4.38	2.72	3.43
	小学	3.61	3.31	4.25	2.55	3.48
	初中	3.68	3.40	4.29	2.65	3.56
	高中及中专	3.79	3.71	4.36	2.99	3.74
	大专及以上	3.67	3.50	4.57	3.03	3.66
	χ^2	6.71	12.14**	5.88	9.81**	10.72**

* $P<0.1$; ** $P<0.05$; *** $P<0.01$

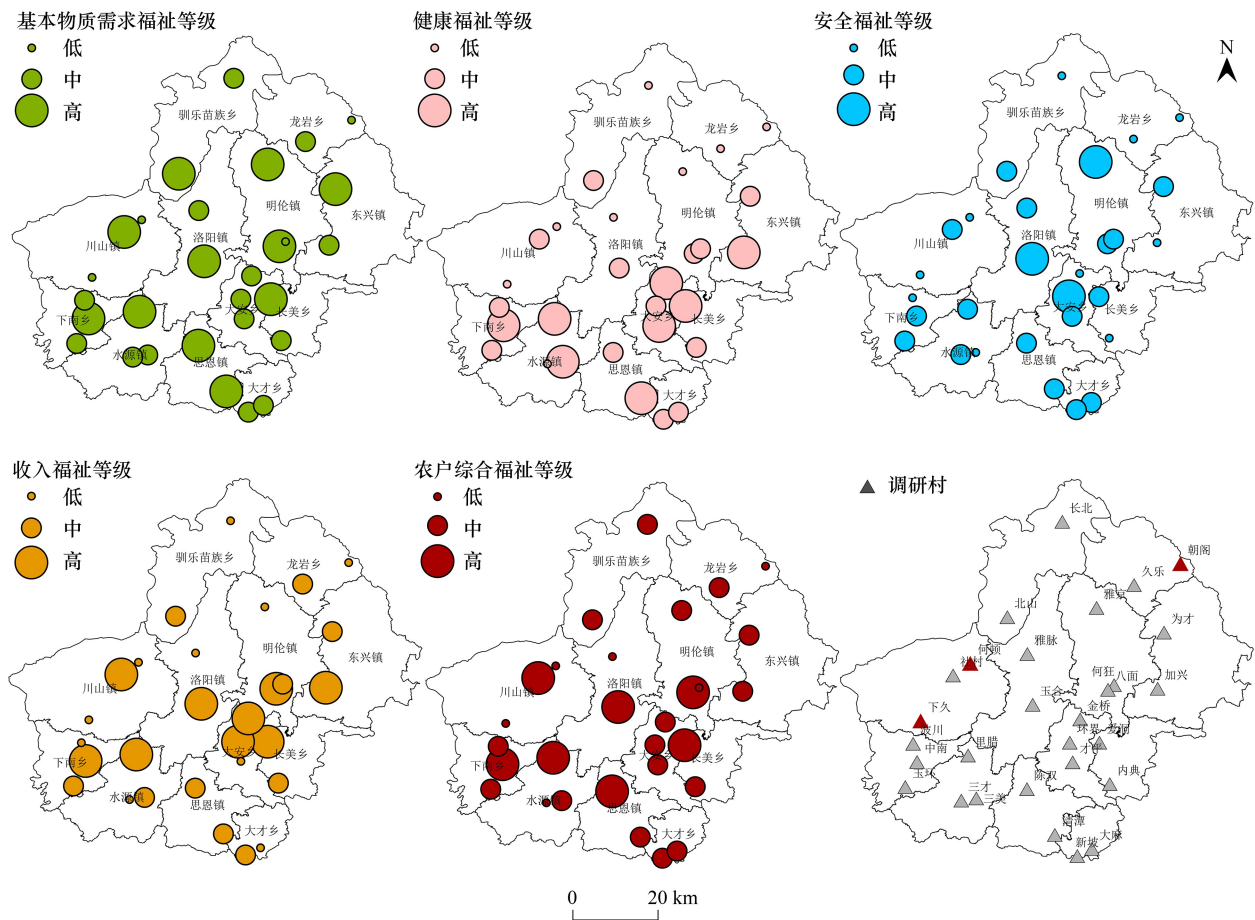


图5 环江县单一维度福祉及农户综合福祉空间分布

Fig.5 Spatial distribution of single-dimensional well-being and households' comprehensive well-being in Huanjiang County

4.3 宏观生态系统服务对农户福祉的影响

在个体水平上计算了各因素的方差膨胀因子发现,其均小于5,说明因素间不存在多重共线性问题,可用

于后续模型分析。根据空模型(模型 I)计算出的组内相关系数(ICC)可知,除安全福祉外(ICC<0.059),其余维度的福祉均可通过双层线性回归分析探索村域层面变量对因变量的解释(表 4)。其中,农户综合福祉的 ICC=0.092>0.059,意味着农户综合福祉的异质性有 9.2%来自于村域差异,有 90.8%来自于个体差异;基本物质需求福祉的 ICC=0.109>0.059,表明基本物质需求福祉的异质性有 10.9%来自于村域差异,有 89.1%来自于个体差异;健康福祉的 ICC=0.076>0.059,反映出健康福祉的异质性有 7.6%来自于村域差异,有 92.4%来自于个体差异;收入福祉的 ICC=0.077>0.059,说明收入福祉的异质性有 7.7%来自于村域差异,有 92.3%来自于个体差异。

表 4 空模型(模型 I)
Table 4 The results of the null model

变量 Variables	标准差 Standard deviation	方差成分 Variance component	df	X ²	组分相关系数 ICC
基本物质需求 Basic material demand					
组间方差 Between-group variance	0.216	0.047	28	108.396	10.90%
组内方差 Within-group variance	0.619	0.383			
健康 Health					
组间方差 Between-group variance	0.265	0.070	28	81.485	7.60%
组内方差 Within-group variance	0.924	0.854			
收入 Income					
组间方差 Between-group variance	0.319	0.102	28	82.205	7.70%
组内方差 Within-group variance	1.107	1.225			
安全 Security					
组间方差 Between-group variance	0.109	0.012	28	40.817	2.01%
组内方差 Within-group variance	0.765	0.585			
农户综合福祉 Composite well-being					
组间方差 Between-group variance	0.189	0.036	28	93.848	9.20%
组内方差 Within-group variance	0.595	0.354			

4.3.1 个体、村域变量对农户福祉的直接影响

在空模型的基础上,进一步探讨个体、村域变量对农户福祉的直接作用(表 5)。结果表明,农户综合福祉中 10.2%的差异能够被个体变量解释,19.4%的差异能够被村域变量解释。其中,年龄、受教育程度、曾是否为贫困户是影响农户综合福祉的显著个体变量,假设 H1b、H1c、H1e 成立。即,受教育程度越高,年龄越大,曾是贫困户的农户其福祉水平越强。在村域层面上,粮食生产、空气净化、科学教育与农户综合福祉呈显著正相关,假设 H2a、H2e、H2f 成立。即,粮食产量越高,空气质量越佳,文化教育越好的农户福祉水平也越高。

同时,个体与村域层面变量对单一维度福祉的贡献也差异明显。其中,个体变量对基本物质需求福祉的解释率最高,达到 10.2%,对健康、收入福祉的解释率则分别为 9.5%、7.4%。具体而言,性别仅对基本物质需求福祉具有显著影响,反映了男女社会分工差异,女性多操持家庭内务,更能意识到衣食住行的重要性;曾是否为贫困户对健康福祉的影响最大,主要是因为精准扶贫在提高贫困户人均收入的同时有效改善了医疗服务,身心健康有了保障;受教育程度对收入福祉的影响最大,反映了农民受教育程度越高,越有利于择业多元化,进而获得高收入;年龄在所有福祉中对健康福祉的影响最大,随着农户年龄越大,其对当前医疗保障依赖度越高,对健康越重视。此外,村域自变量对健康福祉的解释率最高,达到 40%,对基本物质需求、收入等福祉的解释率则分别为 4.3%、33.3%。其中,粮食生产对收入福祉的影响最大,即粮食产量越多,越有利于提升农户的经济收入;科学教育正向影响基本物质需求福祉,由马斯洛层次需求理论可得,当实现高阶福祉的驱动

因素增多时,低阶福祉的满意度则呈现出漫溢式,因此当科学教育基础设施增加时,侧面反映出基本物质需求福祉已得到满足并呈上升趋势;空气净化对健康福祉的影响最大,即区域内空气质量越好越有益于身体健康。

表 5 随机系数回归模型(模型 II)和截距模型(模型 III)的结果
Table 5 The results of the random coefficient regression model and the intercept model

变量 Variable	基本物质需求 Basic material demand		健康 Health		收入 Income		综合福祉 Composite well-being	
	模型 II	模型 III	模型 II	模型 III	模型 II	模型 III	模型 II	模型 III
个体层面 Individual level								
性别 Gender	-0.11632 **		0.10189		0.04502		-0.04672	
曾是否为贫困户 Previous experience as a poverty-stricken household	0.13809 **		0.26586 ***		0.16763 *		0.16623 ***	
婚姻 Marriage	0.02889		-0.10429		-0.02237		0.01474	
受教育程度 Education level	0.05378 *		0.17556 ***		0.19981 ***		0.10093 ***	
年龄 Age	0.07449 ***		0.15580 ***		0.10877 **		0.08860 ***	
村域层面 Village level								
产水 Water yield		-0.00049		0.00188		0.00087		0.00004
土壤保持 Soil conservation		0.00311		-0.00252		-0.00673		0.00054
固碳 Carbon sequestration		0.00016		0.00183 *		0.00171		0.00058
粮食生产 Food production		0.02256		0.05634 **		0.12263 ***		0.03907 **
科学教育 Scientific education		0.00019 ***		0.00008		0.00002		0.00011 **
空气净化 Air purification		0.07712		0.18017 **		0.12724		0.11092 **
组间方差 Between-group variance	0.451	0.045	0.487	0.042	0.107	0.068	0.365	0.029
组内方差 Within-group variance	0.344	0.383	0.773	0.854	1.134	1.225	0.318	0.354
解释率 Interpretation rate	10.2%	4.3%	9.5%	40.0%	7.4%	33.3%	10.2%	19.4%

* $P<0.1$; ** $P<0.05$; *** $P<0.01$, 个体层自变量解释率 = $(\sigma^2_{\text{模型 I}} - \sigma^2_{\text{模型 II}}) / \sigma^2_{\text{模型 I}}$; 村域层自变量解释率 = $(\tau_{00\text{模型 I}} - \tau_{00\text{模型 III}}) / \tau_{00\text{模型 I}}$

4.3.2 生态系统服务对农户福祉的间接影响

生态系统服务不仅直接影响农户福祉,还可通过个体社会经济特征间接调节农户福祉。为此,本文以农户综合福祉为因变量的完整模型作为基础,重点揭示生态系统服务对农户综合福祉的跨尺度间接调节效应。结果表明(表 6),在粮食生产的调节作用下,年龄,曾是否为贫困户与农户综合福祉呈显著负相关,拒绝原假设 H3a。主要是老年农户因身体老弱滞留于村,成为耕作的主要劳动力,长时间的田间作业会导致劳动负荷过重,福祉水平下降;此外,粮食生产通过曾是否为贫困户对农户综合福祉的方差解释率为负,故不发挥间接作用(表 7)。土壤保持通过受教育程度对农户综合福祉的方差解释率为负,不作为调节变量,假设 H3b 不成立。固碳会对年龄、受教育程度产生影响,进而通过跨尺度正向调节效应促进农户综合福祉提升,假设 H3d 成立,且其方差解释率分别为 24.70%、30.90%。就环江县而言,退耕还林、石漠化治理工程在改善生态环境的同时也带来了一定的经济效益,提高了老年农户生活质量,且农户学历越高对生态认知更深刻,绿化环境越好其满意度越高。科学教育会对受教育程度产生影响,进而通过跨尺度正向调节效应促进农户综合福祉提升,假设 H3f 成立,且其方差解释率为 7.35%,反映了科学教育的完善有利于提高农户的受教育水平,精神越丰富,福祉感知则越强。

表 6 完整模型结果(模型Ⅳ)

Table 6 The results of full model

变量 Variable	回归系数 Regression coefficient					
	产水 Water yield	土壤保持 Soil conservation	固碳 Carbon sequestration	粮食生产 Food production	科学教育 Scientific education	空气净化 Air purification
曾是否为贫困户 Previous experience as a poverty-stricken household	0.00102	0.00393	-0.00099	-0.05186 *	-0.00001	0.07515
受教育程度 Education level	-0.00048	0.00489 **	0.00199 ***	0.01628	0.00007 *	0.00915
年龄 Age	0.00088	0.00238	0.00092 *	-0.02184 *	-0.00004	-0.00515

* $P<0.1$; ** $P<0.05$; *** $P<0.01$; 个体层面仅纳入模型Ⅱ农户综合福祉中显著的个体变量

表 7 生态系统服务间接作用解释农户综合福祉的方差成分

Table 7 The indirect effect of ecosystem services explains the variance component of households' comprehensive well-being

变量 Variable	原始方差 Original variance	条件方差 Conditional variance	方差解释率 Explained variance ratio
固碳服务 Carbon sequestration			
受教育程度 Education level	0.0068	0.0047	30.90%
年龄 Age	0.0073	0.0055	24.70%
土壤保持服务 Soil conservation			
受教育程度 Education level	0.0068	0.0071	-4.41%
科学教育服务 Scientific education			
受教育程度 Education level	0.0068	0.0063	7.35%
粮食生产服务 Food production			
年龄 Age	0.0073	0.0071	2.74%
曾是否为贫困户 Previous experience as a poverty-stricken household	0.0192	0.0275	-43.23%

5 结论、讨论与建议

本文以典型喀斯特区——环江县为例,通过宏观生态系统服务与个体微观特征构建了农户-乡村双层嵌套数据结构,借助多层线性模型探讨了生态系统服务对农户福祉跨尺度影响的直接和间接作用。结果表明,研究区生态系统服务供给能力整体呈提升趋势,这与相关研究结果一致^[29];农户福祉的异质性特征明显,且安全福祉最高,揭示了区域良好的民风 and 治安。生态系统服务和个体特征对农户福祉产生了显著直接影响。其中,个体特征中除年龄、受教育程度等已被证明与农户福祉显著相关外^[13—15],曾是否为贫困户也与区域农户福祉关系密切,主要归因于该区域内多曾是贫困村,政府救济在其生活中占有重要比例。粮食生产、科学教育和空气净化功能的提升会直接增强农户综合福祉,且空气净化的作用更显著。主要是因为喀斯特农村地区通常存在着面源污染、生物质燃烧等问题,这对农户的健康和生活环境造成了不利影响,而空气净化带来了充足的洁净空气,保障了农户的身心健康和^[27]生活质量,对于增进农户综合福祉具有重要意义。生态系统服务还可对个体特征施加影响,进而对农户综合福祉产生间接作用,其中以调节服务的影响最突出。主要是因为退耕还林、还草等生态恢复措施可以直接提高植被固碳能力,从而有效改善土壤结构,提供更好的抗侵蚀能力,在改善生态环境的同时还带来了生态补偿效益和就业岗位(护林员等),进而提升农户综合福祉。此外,与相关研究得出的供给服务对农户福祉具有显著正向调节作用的结论不同^[14],环江县粮食生产会对年龄施加影响,进而对农户福祉产生负向调节作用,主要是因为在外务工潮流冲击下农村大量年轻劳动力流失,缺乏先进知识和技术的老年农户成为了传统农耕的主要劳动力,但是传统耕种方式一方面会加重老年人的身体负担,同时对土地扰动严重,容易导致生态退化从而引发生态系统结构功能紊乱^[37],陷入“生态诅咒”,导致

福祉偏低。

根据调节服务在提升农户福祉中的关键作用以及老龄化、低学历在提升农户福祉中的限制作用,并结合马斯洛需求理论,排列生态系统服务层级关联性,针对环江县实际情况,提出了逆向递阶式调控区域生态系统服务的建议,具体如下(图6):

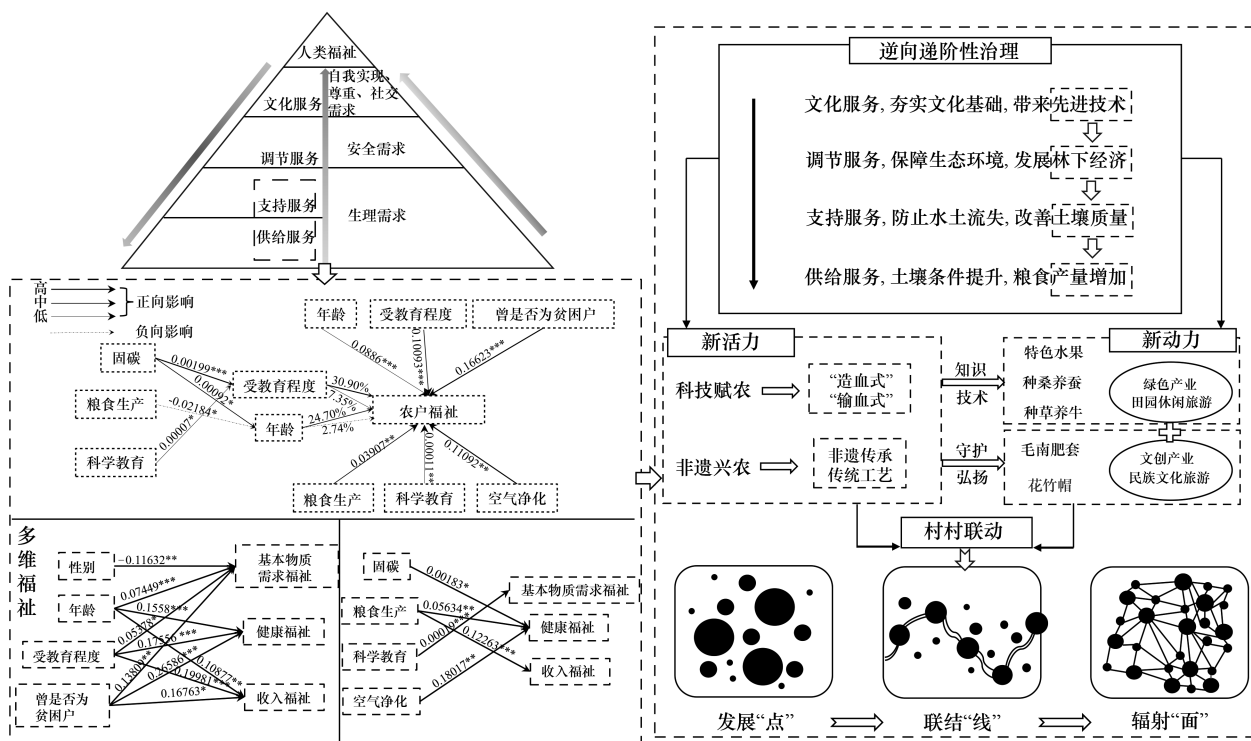


图6 决策建议框架

Fig.6 Decision suggestion framework

(1) 合理利用现代与传统文化,有效缓解弱势群体造成的农村劳动力疲态。一方面通过农业生产合作社对农户进行定期技术培训,推广可持续农业实践,改变传统农业形式;实施相应的创业支持、优惠政策,吸引人才返乡,通过“造血式”+“输血式”的内外联合焕发乡村活力,实现“科技赋农”。另一方面,采用“非遗+旅游”的模式,充分发挥毛南族肥套和花竹帽编织两个国家级非物质文化遗产的价值优势,打造兼顾经济发展与文化保护的非遗文创产业,形成规模性少数民族文化体验式旅游,增添非农就业岗位。

(2) 持续推进农业产业结构调整,充分发挥其社会-生态效益。环江县农户之前多以种植玉米为生,经济收益甚微且对土地扰动较大,导致基岩裸露,石漠化问题突出,为此,调整农业结构势在必行。首先,应继续强化特色水果、种草养牛、种桑养蚕等绿色产业,延长产业链加工生产特色农产品、打造地方品牌;其次,利用“线上+线下”营销模式,将特色产品销往外地,形成喀斯特产业可持续发展新范式;最后,通过采摘水果、参与丝绸制作、田园综合体等生态休闲旅游模式,使农户参与到建设和管理中,在增加其经济收入的同时激励其参与生态环境保护,建立生态-经济相融合的发展模式。

(3) 全面强化“村村联动”,形成“点-线-面”协同发展格局。充分挖掘和利用各类资源,形成互补性产业链条,实现全域协同发展。首先,根据各村产业发展差异化优势,如“水果村”、“丝绸村”、“非遗村”、“民族村”等形成发展节点;其次,加强基础设施建设,率先联结优势村庄,通过农业合作社、农民专业合作社等形式构建互补式特色路径,如,“非遗+丝绸+旅游”的非遗工艺体验式村庄带和“水果+民族+旅游”的休闲式民族风情村庄带;最后,依靠核心村庄及交通路网的辐射作用带动区域其它村庄发展,以整体性提升区域农户福祉。

本文以宏微观数据为基础,在对环江县生态系统服务、农户福祉的时空特征进行解析的基础上,构建双层线性模型识别了宏观生态系统服务对农户福祉的跨尺度影响,为实现生态系统服务社会福祉最优提供了科学参考。但是生态系统服务与农户福祉之间不仅存在单向的级联效应,更是相互耦合的关系,未来应更侧重于两者之间的互馈过程与机理解析;同时,应更加关注生态系统服务与农户福祉的长期变化及影响,在空间上实现宏观生态环境管理与福祉研究的精准落地。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). Ecosystems and human well-being. Washington, D.C.: Island Press, 2005
- [3] 赵士洞, 张永民. 生态系统与人类福祉——千年生态系统评估的成就、贡献和展望. 地球科学进展, 2006, 21(9): 895-902.
- [4] Tian Y C, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Xu Y. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China. Science of the Total Environment, 2016, 566: 1297-1308.
- [5] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 裴顺祥, 辛学兵. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算. 生态学报, 2020, 40(4): 1405-1412.
- [6] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [7] 申津羽, 韩笑, 侯一蕾, 温亚利. 贫困山区的农户主观福祉影响因素研究——以湖南省湘西州为例. 资源科学, 2014, 36(10): 2174-2182.
- [8] Delgado L E, Marín V H. Well-being and the use of ecosystem services by rural households of the Río Cruces watershed, southern Chile. Ecosystem Services, 2016, 21: 81-91.
- [9] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 牛海鹏, 杨德刚. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响. 资源科学, 2017, 39(3): 533-544.
- [10] 梅子钰, 张雅茹, 黄心言, 刘志成. 基于生态系统服务的青海湖流域生态风险评估及其空间异质性影响因素分析. 生态学报, 2024, 44(12): 4973-4986.
- [11] 霍冉, 鲁博, 徐向阳, 高俊莲, 祝婷婷. 基于当地居民感知视角的煤炭资源型城市生态系统服务福祉效应研究——以新泰市为例. 中国土地科学, 2019, 33(9): 101-110.
- [12] 杨莉, 甄霖, 李芬, 魏云洁, 姜鲁光, 曹晓昌, 龙鑫. 黄土高原生态系统服务变化对人类福祉的影响初探. 资源科学, 2010, 32(5): 849-855.
- [13] 刘迪, 陈海, 张行, 史琴琴, 耿甜伟. 黄土丘陵沟壑区生态系统服务对人类福祉的影响及其群体差异. 地理研究, 2022, 41(5): 1298-1310.
- [14] Wang Y, Sun J L, Liu C C, Liu L H. Exploring the nexus between perceived ecosystem services and well-being of rural residents in a mountainous area, China. Applied Geography, 2024, 164: 103215.
- [15] Hossain M S, Eigenbrod F, Amoako Johnson F, Dearing J A. Unravelling the interrelationships between ecosystem services and human wellbeing in the Bangladesh delta. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2017, 24(2): 120-134.
- [16] Wei H J, Liu H M, Xu Z H, Ren J H, Lu N C, Fan W G, Zhang P, Dong X B. Linking ecosystem services supply, social demand and human well-being in a typical mountain-oasis-desert area, Xinjiang, China. Ecosystem Services, 2018, 31: 44-57.
- [17] 茹克亚·萨吾提, 阿斯娅·曼力克, 李虎, 尼加提·卡斯木, 郑逢令, 李学森, 热娜·阿不都克力木, 亚森·喀哈尔. 乌鲁木齐山地草地生态系统服务价值变化评估——基于遥感与 GIS. 生态学报, 2020, 40(2): 522-539.
- [18] 智烈慧, 周方文, 李晓文, 马田田, 邵冬冬, 白军红, 崔保山, 郭卫华. 基于生态系统服务优化的滨海湿地一体化保护—修复格局构建. 自然资源学报, 2023, 38(12): 3150-3165.
- [19] 肖华斌, 何心雨, 王玥, 王洁宁, 姜芊孜. 城市绿地与居民健康福祉相关性研究进展——基于生态系统服务供需匹配视角. 生态学报, 2021, 41(12): 5045-5053.
- [20] Peng L, Chen T T, Deng W, Liu Y. Exploring ecosystem services trade-offs using the Bayesian belief network model for ecological restoration decision-making: a case study in Guizhou Province, China. Ecological Indicators, 2022, 135: 108569.
- [21] Zhou Y, Li Y R, Liu Y S. The nexus between regional eco-environmental degradation and rural impoverishment in China. Habitat International, 2020, 96: 102086.
- [22] Huang Q X, Yin D, He C Y, Yan J B, Liu Z W, Meng S T, Ren Q, Zhao R, Inostroza L. Linking ecosystem services and subjective well-being in rapidly urbanizing watersheds: Insights from a multilevel linear model. Ecosystem Services, 2020, 43: 101106.
- [23] Tang Z Y, Xie M M, Chen B, Xu M, Ji Y H. Do social and ecological indicators have the same effect on the subjective well-being of residents?

- Applied Geography, 2023, 157: 102994.
- [24] Meli P, Vieli L, Spirito F, Reyes-Riveros R, Gonzalez-Suhr C, Altamirano A. The importance of considering human well-being to understand social preferences of ecosystem services. *Journal for Nature Conservation*, 2023, 72: 126344.
- [25] Mastekaasa A. Age variations in the suicide rates and self-reported subjective well-being of married and never married persons. *Journal of Community & Applied Social Psychology*, 1995, 5(1): 21-39.
- [26] Jones S K, Boundaogo M, DeClerck F A, Estrada-Carmona N, Mirumachi N, Mulligan M. Insights into the importance of ecosystem services to human well-being in reservoir landscapes. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100987.
- [27] Song C, Lee W K, Choi H A, Kim J, Jeon S W, Kim J S. Spatial assessment of ecosystem functions and services for air purification of forests in South Korea. *Environmental Science & Policy*, 2016, 63: 27-34.
- [28] Kaltenborn B P, Linnell J D C, Gómez-Baggethun E. Can cultural ecosystem services contribute to satisfying basic human needs? A case study from the Lofoten archipelago, northern Norway. *Applied Geography*, 2020, 120: 102229.
- [29] Qi X K, Li Q, Yue Y M, Liao C J, Zhai L, Zhang X M, Wang K L, Zhang C H, Zhang M Y, Xiong Y. Rural-urban migration and conservation drive the ecosystem services improvement in China karst: a case study of Huanjiang county, Guangxi. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 566.
- [30] 李立学, 郝秀东, 欧阳绪红, 薛美玲, 劳月英, 秦琳娟, 韦嘉胜. 桂西北喀斯特峰丛洼地区表土孢粉与现代植被关系研究——以环江县蒙峒洼地为例. *地理科学*, 2023, 43(11): 2060-2068.
- [31] Zhang M Y, Zhang L, Ren X L, He H L, Lv Y, Wang J B, Yan H M. Effect of land use and land cover change on the changes in net primary productivity in Karst areas of southwest China: a case study of Huanjiang Maonan autonomous county. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(6): 606-616.
- [32] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [33] 陈田田, 王钰茜, 曾兴兰, 王强. 西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应. *生态学报*, 2023, 43(6): 2253-2270.
- [34] 孟欣宇, 吴远翔. 城市生态系统服务供需簇与生态功能管控——以齐齐哈尔市中心城区为例. *应用生态学报*, 2023, 34(12): 3393-3403.
- [35] Wang B J, Tang H P, Xu Y. Integrating ecosystem services and human well-being into management practices: Insights from a mountain-basin area, China. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 58-69.
- [36] Cao M T, Xu D D, Xie F T, Liu E L, Liu S Q. The influence factors analysis of households' poverty vulnerability in southwest ethnic areas of China based on the hierarchical linear model: a case study of Liangshan Yi autonomous prefecture. *Applied Geography*, 2016, 66: 144-152.
- [37] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.