



戴永务,朱玮晗,杨舒棋,黄纪星,易祥发,林金煌. 长江经济带生态系统健康时空格局及其影响因素[J]. 中国农业大学学报,2025,30(01):188-205.

DAI Yongwu, ZHU Weihang, YANG Shuqi, HUANG Jixing, YI Xiangfa, LIN Jinhuang. Spatial and temporal patterns of ecosystem health in the Yangtze River Economic Zone and their influencing factors[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01): 188-205.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.17

长江经济带生态系统健康时空格局及其影响因素

戴永务¹ 朱玮晗² 杨舒棋² 黄纪星² 易祥发² 林金煌^{2*}

(1. 福建农林大学 经济与管理学院,福州 350002;

2. 福建农林大学 数字经济学院,福建 泉州 362400)

摘要 为保障区域生态系统健康和可持续发展,以长江经济带为研究区,构建“活力—组织—恢复力—生态系统服务”的生态系统健康评估体系,分析2000、2010和2020年长江经济带生态系统健康的时空演变特征,并运用地理探测器和地理加权回归模型,解析其主要影响因素及其空间分异特征。结果表明:1)2000—2020年,长江经济带的生态系统健康状况呈现整体略微下降的趋势,由2000年的0.588下降到2020年的0.569;2)整体上,长江经济带生态系统健康具有较强的空间正相关性,其空间集聚效应呈现出“南部高,北部低”的基本趋势,高-高集聚主要分布在中游和下游的南部地区,低-低集聚区域主要分布在下游的北部地区,而低-高集聚和高-低集聚则呈零散分布;3)长江经济带生态系统健康的主要影响因素表现为:植被覆盖度>城镇化>人口密度>高程,且各驱动因子对生态系统健康的影响存在明显的空间异质性。本研究阐明了2000—2020年长江经济带生态系统健康的时空格局及其影响因素,可为长江经济带制定差异化、精细化的生态管理策略提供依据。

关键词 生态系统健康;时空格局;地理探测器;地理加权回归模型;长江经济带

中图分类号 X171.1

文章编号 1007-4333(2025)01-0188-18

文献标志码 A

Spatial and temporal patterns of ecosystem health in the Yangtze River Economic Zone and their influencing factors

DAI Yongwu¹, ZHU Weihang², YANG Shuqi², HUANG Jixing², YI Xiangfa², LIN Jinhuang^{2*}

(1. College of Economics and Management, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. College of Digital Economy, Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362400, China)

Abstract To promote the healthy management and sustainable development of regional ecosystems, the Yangtze River Economic Belt was taken as the study area to construct an ecosystem health assessment system based on the concept of “Vitality-Organization-Resilience-Ecosystem Services”, and analyze the spatial and temporal evolution of ecosystem health in 2000, 2010 and 2020. We analyzed the spatial and temporal evolution of ecosystem health in the Yangtze River Economic Zone in 2000, 2010 and 2020, and analyzed the main influencing factors and their spatial differentiation characteristics by using geodetectors and geographically weighted regression models. The results showed that: 1) From 2000 to 2020, the ecosystem health of the Yangtze River Economic Zone displayed a decreasing trend, which was from 0.588 in 2000 to 0.569 in 2020; 2) On the whole, the ecosystem health of the Yangtze River Economic Zone had a strong spatial correlation, and its spatial agglomeration effect shows the basic trend of “high in the south

收稿日期: 2024-07-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71973027);福建省高校特色新型智库集体林业改革发展中心建设专项(K80RAQ04A);福建省社科研究基地重大项目(FJ2023JDZ029);福建农林大学习近平生态文明思想研究院开放课题(STWMSX23-01)

第一作者: 戴永务(ORCID:0000-0002-8562-5733),教授,主要从事林业经济理论与政策、生态文明建设等研究,E-mail:fjdyw@163.com

通讯作者: 林金煌(ORCID:0009-0003-8076-1888),讲师,主要从事生态环境评估研究,E-mail:jh_lin@fafu.edu.cn

and low in the north". The high-high agglomeration mainly distributed in the southern region of the middle and lower reaches, low-low agglomeration mainly distributed in the northern region of the lower reaches, and low-high agglomeration and high-low agglomeration distributed in a piecemeal manner. 3) The main influencing factors on ecosystem health in the Yangtze River Economic Zone were manifested as follows: vegetation cover>urbanization>population density>elevation, and there was obvious spatial heterogeneity in the influence of each driving factor on ecosystem health. This study reveals the spatial and temporal patterns of ecosystem health and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2020, which can provide a basis for formulating differentiated and refined ecological management strategies in the Yangtze River Economic Belt.

Keywords ecosystem health; spatial and temporal patterns; Geodetector; geo-weighted regression model; Yangtze River Economic Belt

生态系统健康通常是指不同生态系统组成的特定地域综合体在维持各生态系统自身健康的前提下,具备持续性、稳定性地提供生态系统服务的能力^[1]。近40年来,在气候变化和人为干扰的双重作用下,我国部分地区的生态系统健康遭受破坏,出现生境质量下降、土地退化和生物多样性减少等一系列环境问题,严重威胁到区域可持续发展和美丽中国建设^[2-3]。长江经济带是生态文明建设和经济高质量发展的先行示范带,也是中央重点实施的“三大战略”之一,在国家发展的区域大战略中地位突出^[4]。2023年10月,习近平总书记在江西南昌主持召开进一步推动长江经济带高质量发展座谈会,指出要加强长江经济带生态环境综合治理和生态环境分区管控^[5]。因此,开展长江经济带生态系统健康的长期动态监测及其影响因素分析具有迫切的现实需求,对推动长江经济带高质量发展具有重要意义。

近年来,已有研究针对区域生态系统健康评估及其影响因素探测方面进行了大量实践。基于不同尺度构建各种生态系统健康评估模型对河流^[6-8]、沿海地区^[9]、山区^[10]、牧区^[11]和森林^[12]等区域进行生态系统健康评估。其中,在生态系统健康量化评估方面,主要通过指示物种法^[13-14]和指标体系法^[15-16]来进行区域生态系统健康评估。指示物种法是常用的间接监测特定区域生态系统健康的方法,主要通过指示物种的数量、多样性和群落结构等指标来间接评估生态系统的健康状况,但一般只能用于单个生态系统的健康评估^[17]。而指标体系法则是综合考虑生态系统的多个指标来构建理论框架模型,更能反映生态系统健康与人类活动、区域环境之间的互动关系。常见的指标体系法主要有压力—状态—响应(PSR)模型^[18]、驱动力—压力—状

态—影响—响应(DPSIR)模型^[19]、活力—组织—恢复力(VOR)模型^[20]和活力—组织—恢复力—服务(VORS)模型^[21]。其中,PSR模型和DPSIR模型能衡量生态系统的状态和外部干扰,但忽视了对生态系统服务供给能力的评估。Costanza等^[22]在2012年提出生态系统健康与生态系统服务息息相关,能否为区域持续性地提供各种生态系统服务供给应成为生态系统健康评估的重要衡量标准。VORS模型对传统的活力—组织—恢复力(VOR)模型进行了拓展^[23],将生态系统服务功能纳入生态系统健康的评估框架,综合考虑人类福祉与自然生态系统的内在耦合关系,且具有操作便捷、评价客观的优点,因而被广泛应用于区域的生态系统健康评估^[24-26]。自1997年以来,关于生态系统服务的测算主要通过价值单量法来进行定量化评估,但该方法仅考虑土地利用类型的影响,评估结果相对片面且无法反映区域的空间异质性特征。而随着生态系统服务评估研究的进一步拓展,InVEST模型已逐渐成为现今生态系统服务测算领域应用较为广泛的模型。通过InVEST软件提供的各种测算模型,可以模拟和评估诸如碳储量、水源涵养、土壤保持和生境质量等各种生态系统服务功能的时空演化规律及其动态过程^[27-28]。因此,已有研究尝试借助InVEST模型测度区域生态系统服务功能,并将其纳入生态系统健康的评估模型,进而构建“活力—组织—恢复力—服务”的生态系统健康综合评估框架^[29]。近年来,随着研究不断深入,对现有生态系统健康评估方法进行改进与优化,通过引入新的指标来构建更为全面的生态系统健康评估框架,进而提高区域生态系统健康评估的有效性和准确性^[30-31]。如:通过引入空间权重系数和修正的空间邻近效应系数对VORS模型进行改良,并基于改良

的模型对黄河中游的生态系统健康进行动态评估^[30];通过整合生态系统可持续供给和生态系统完整性对现有评估方法模型进行改进,并对2000—2020年中国的生态系统健康进行空间量化评估^[31]。此外,在生态系统健康评估的基础上,开展区域生态系统健康影响因素的探测研究,主要采用地理探测器^[32]、耦合协调度模型^[33]和地理加权回归模型^[34]等方法来探究自然和人为干扰因素对区域生态系统健康的影响机理及过程响应,进而准确揭示区域生态系统健康时空演化规律的内在机理,为开展区域精细化的生态管理及分区优化提供重要前提。

已有研究针对区域的生态系统健康开展了丰富的研究,但仍存在以下3个方面的局限性:1)已有研究大多集中在省级、市级尺度,而基于栅格和县域尺度的区域精细化生态系统健康评估的研究相对不足;2)当前,已有研究逐渐开始重视生态系统服务在生态系统健康评估中的重要性,但基于InVEST模型来测度综合生态系统服务能力^[35]的研究还相对较少;3)此外,探究区域生态系统健康主要影响因素及其空间异质性的研究仍有待深化。鉴于此,本研究拟以长江经济带为研究对象,运用InVEST模型测度区域的综合生态系统服务,并将其纳入VORS模型的评估体系,构建“活力—组织—恢复力—生态系统服务”的生态系统健康评估体系,从县域尺度揭示2000—2020年长江经济带生态系统健康的时空格局,并综合运用地理探测器和地理加权回归模型,探究其主要影响因素及其空间分异特征,以期为长江经济带的国土空间规划提供依据,实现长江经济带精细化、差异化的生态管理。

1 研究区概况

长江经济带(21°08′45″~34°56′47″N, 97°31′50″~121°53′23″E)横跨我国东中西三大地带,联接了11个省市,面积约205.23万km²,占中国国土面积的21.40%,拥有着丰富的自然资源和多样的生态系统类型(图1)。长江经济带地貌复杂,以山地丘陵为主,地势西高东低,其气候类型以亚热带季风气候为主,年均降水量约为1000mm。2022年,长江经济带总人口约6.06亿人,占全国的42.90%,地区生产总值为55.98万亿元,贡献了全国46.50%的经济总量。自2016年以来,长江经济

带坚持“共抓大保护,不搞大开发”的原则,实施了退耕还林、三北防护林等一系列的生态保护政策。然而,伴随着城镇化进程的快速推进,长江经济带生态保护压力日益增加,区域的生态系统健康遭受严重威胁。

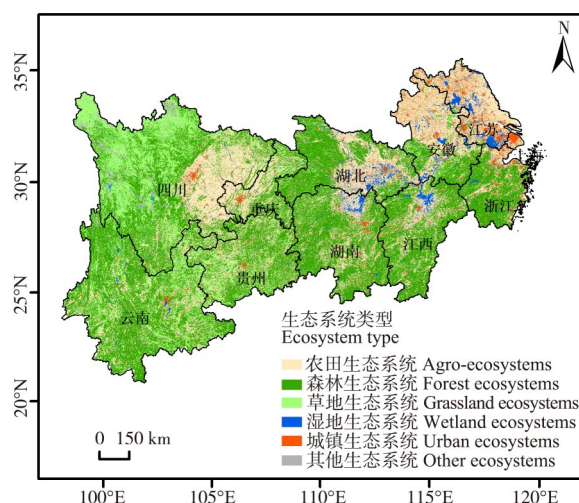


图1 研究区生态系统类型分布

Fig. 1 Distribution of ecosystem types in the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 基于VORS模型的生态系统健康研究框架构建

基于多源数据和地理信息空间分析技术,构建2000、2010和2020年长江经济带生态系统健康的研究框架(图2),探讨长江经济带生态系统健康时空格局、主要影响因素及其空间分异特征。研究框架主要分为4个部分:1)基于多源数据构建“活力—组织—恢复力—生态系统服务”评估框架,揭示2000—2020年长江经济带生态系统健康的时空格局;2)利用空间自相关模型,从全局和局部的角度分析长江经济带生态系统健康的空间集聚特征;3)运用地理探测器和地理加权回归模型,探究长江经济带生态系统健康的主要影响因素及其空间分异特征;4)基于生态系统健康评估结果,探究长江经济带的差异化、精细化的生态管理策略。

2.2 数据来源及预处理

基于VORS模型构建长江经济带生态系统健康的评估框架,进而对长江经济带2000—2020年的生态系统健康时空演变及其影响因素进行分析。

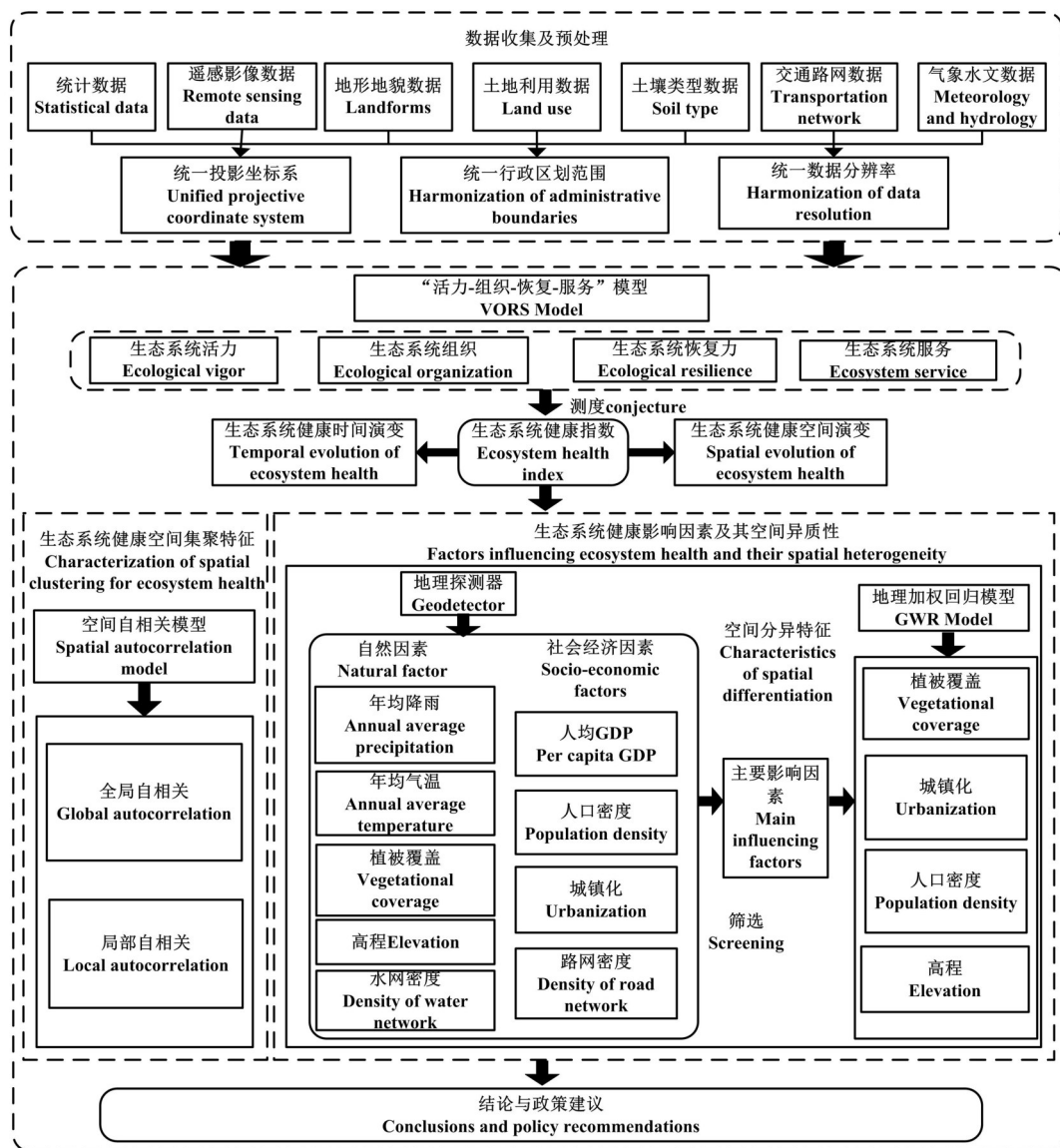


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

其中,VORS模型表征的是生态活力(EV)、生态组织(EO)、生态恢复力(ER)和生态系统服务(ES),分别从土地利用、社会经济、水文条件、交通条件、植被覆盖、土壤状况、地形地貌、气候条件和粮食生产等多个维度,构建长江经济带生态系统健康评估的评价指标体系,具体数据详见表1。

运用ArcGIS10.2软件的分区统计功能计算归一化植被指数以表征生态系统活力,利用Fragstats 4.2软件的移动窗口法分别计算重要生态系统连通性(CIE)、景观异质性(LH)和整体景观连通性(LC)等景观格局指数以表征生态系统组织,采用InVEST软件计算碳固存、土壤保持、产水量、生境

质量和粮食供给这5类关键的生态系统服务以表征综合生态系统服务供给,采用夜间灯光的数据对城镇化水平进行表征^[35]。基于ArcGIS 10.2软件平台将所有空间数据统一重采样至1 km × 1 km空间分辨率,将数据空间化至县域单元,且将所有空间数据的投影坐标系统一为Krasovsky_1940_Albers,构建GIS的空间数据库。此外,运用SPSS26.0软件对各类生态系统健康指标进行归一标准化处理,避免因数量差异和量纲不同造成的影响。

2.3 研究方法

2.3.1 基于VORS模型的生态系统健康评价

1) 生态系统活力(EV):通常是指区域生态系

表1 数据来源
Table 1 Data source

数据类型 Data type	指标 Index	年份 Year	分辨率/m Resolution rate	数据来源 Data source
土地利用 Land use	土地利用类型	2000、2010、2020	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
社会经济 Society and economy	人口密度	2000、2010、2020	1 000	国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn/ngcc/)
	人均GDP	2000、2010、2020	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
	NPP-VIIRS 夜间灯光	2020	500	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
水文条件 Hydrological condition	流域	2000、2010、2020		中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
交通条件 Traffic conditions	道路	2020		中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
行政区划 Administrative division	省级、县级行政区划	2000、2010、2020		中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
植被覆盖 Vegetational coverage	归一化植被指数	2000、2010、2020	1 000	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
土壤状况 Soil status	土壤质地	2009	1 000	国家青藏高原科学数据中心世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集 (https://data.tpd.ac.cn)
地形地貌 Landform	数字高程模型	2020	250	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn)
气候条件 Climatic condition	降雨量	2000、2010、2020	30	中国气象要素站点观测逐月数据集 (https://www.resdc.cn)
	蒸发量	2000、2010、2020	30	中国气象要素站点观测逐月数据集 (https://www.resdc.cn)
	气温	2000、2010、2020	30	中国气象要素站点观测逐月数据集 (https://www.resdc.cn)
粮食生产 Grain production	粮食产量	2000、2010、2020		2000、2010年和2020年《中国县域统计年鉴》 ^[36]

统的初级生产力或新陈代谢能力。归一化植被指数(NDVI)与植被净初级生产力和生长密切相关,是植物在红色波段强吸收特性和近红色波段强反射特性的结合,被广泛证明是评估生态系统活力水平的有效指标^[37]。因此,本研究采用归一化植被指数(NDVI)来表征区域的生态系统活力水平。具体计算公式如下:

$$EV = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \tag{1}$$

式中:EV为生态系统活力;NIR为近红外波段;RED为红色波段。

2)生态系统组织力(EO):主要用以描述生态系统结构和功能的完备性和稳定性,常采用重要生态系统连通性(CIE)、景观异质性(LH)和整体景观连通性(LC)来表征。参考已有研究^[30,38]的计算方法,将景观异质性、整体景观连通性和重要生态系统连通性的权重赋值为0.35、0.35和0.3。

$$\begin{aligned} EO = & 0.35LH + 0.35LC + 0.30CIE = \\ & (0.10AWMPFD + 0.25SHDI) + \\ & (0.25DIVISION + 0.10CONTAG) + \\ & (0.10DIVISION_f + 0.05COHESION_f + \\ & 0.10DIVISION_w + 0.05COHESION_w) \end{aligned} \tag{2}$$

式中:EO为生态系统组织力;LC、LH、CIE分别为整体景观连通性、景观异质性和重要生态系统连通性;AWMPFD和SHDI分别为面积加权斑块分形维数和香浓多样性指数,用以表征景观异质性;DIVISION和CONTAG分别为景观划分指数和景观传染指数,用以表征整体景观连通性;DIVISION和COHESION分别为斑块破碎度指数和斑块凝聚指数,用以表征重要的生态系统连通性。其中,DIVISION_l和DIVISION_w分别为林地和水域的斑块破碎度指数,COHESION_l和COHESION_w分别为林地和水域的斑块凝聚指数。

3)生态系统恢复力(ER):是指生态系统受到外部干扰后恢复其原有结构和功能的能力,即胁迫消失时,系统克服压力及反弹恢复的容量^[14]。由于土地利用在生态系统恢复力概念中具有重要作用,因此对不同土地利用类型赋予不同的生态系统恢复力系数来量化空间实体的生态系统恢复力。参考已有研究^[39],将耕地、林地、草地、水域、建设用和未利用地的生态恢复力系数分别赋权为0.5、0.9、0.6、0.8、0.4和0.3。

4)综合生态系统服务(ES):基于InVEST模型测度了5种典型的生态服务供给能力,具体测算方法如表2所示。在此基础上,本研究采用层次分析法,对这5类生态系统服务进行权重赋值,将碳固存、土壤保持、产水量、生境质量和粮食供给的权重赋值为0.21、0.19、0.15、0.2和0.25,进而定量测算2000—2020年长江经济带的综合生态系统服务指数^[1,29],具体计算公式如下:

$$ES_i = \sum_{j=1}^m ES_{ij} \times W_j \quad (3)$$

式中:ES_i为第*i*个栅格单元的综合生态系统服务指数;*m*为生态系统服务的种类(*m*=5);ES_{*i,j*}为第*i*个栅格单元的第*j*种生态系统服务类型的标准化值;W_{*j*}为各类生态系统服务的权重系数。

参考文献^[31]用生态系统健康指数的平均值来表征区域的生态系统健康状况。具体公式如下:

$$EHI = \sqrt{PHI \times ES} \quad (4)$$

$$PHI = \sqrt[3]{EV \times EO \times ER} \quad (5)$$

式中:EHI为生态系统健康指数;PHI为自然生态系统健康指数;ES为综合生态系统服务指数;EV、EO和ER分别为活力、组织和恢复力。运用自然断点法,将自然生态系统健康指数、综合生态系统服务

指数和生态系统健康指数均划分为低值、较低值、中值、较高值和高值5个等级。

2.3.2 地理探测器模型

地理探测器是一种揭示地理要素的空间分异性特征以及探测其影响因素的空间统计工具,可保证对多变量共线性的免疫,被广泛用于各类地理现象的主要影响因素的探测中^[24,45]。基于数据的可获得性和科学性,参考已有成果和区域实际情况^[24,30,40],从自然、经济、生态等多方面选取指标,并利用地理探测器模型识别长江经济带生态系统健康的主要影响因素,选取2020年的年均降雨(X1)、年均气温(X2)、植被覆盖(X3)、高程(X4)、水网密度(X5)、人均GDP(X6)、人口密度(X7)、城镇化(X8)和路网密度(X9)这9个指标构建长江经济带生态系统健康的驱动因子,并将自变量的值按升序离散为等间隔的10个水平。本研究以生态系统健康为因变量,以各影响因素为自变量,探究生态系统健康的主要影响因素。计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中:*l*为研究区域内解释变量的分类数;*q*为驱动因子的解释程度;*i*为自变量或因变量的分层;*N_i*为*i*层的单元数量;*N*为全域的单元数量; σ_i^2 为层*i*内因变量的方差; σ^2 为全域内因变量的方差。*q*值为0~1,*q*值越大,表示因子对被解释变量的解释力越强。

2.3.3 空间自相关分析

空间自相关模型是一种探究空间数据的分布特征与相互关系的统计方法,可从全局和局部2个方面来测度相邻空间某一观测量的相关性和分异性。观测变量全局上的相关性强弱程度主要通过全局莫兰指数来表征,局部相邻单元空间自相关的关联性与异质性强弱程度常用局部莫兰指数来表征。计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

$$I_{local} = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中:*I*为全局莫兰指数;*I_{local}*为局部莫兰指数;*n*为县

表2 各生态系统服务能力量化方法

Table 2 Quantitative methods for the service capacity of various ecosystems

生态系统服务类型 Ecosystem service type	计算方法 Calculation method	计算公式 Formula
碳固存 Carbon sequestration	综合考虑地下生物量、地上生物量、死亡有机质和土壤有机质四个碳库的固碳量,根据平均碳密度与不同土地利用/覆盖类型的面积进行测算 ^[40] 。	$CS_{total} = CS_{above} + CS_{below} + CS_{soil} + CS_{dead}$ 式中: CS_{total} 为生态系统碳总储量; CS_{above} 为地上碳储量; CS_{below} 为地下碳储量; CS_{soil} 为土壤碳储量; CS_{dead} 为死亡有机质碳储量。
土壤保持 Soil conservation	基于修正通用土壤流失方程模型分别测度区域的实际土壤侵蚀量和土壤潜在侵蚀量,并通过计算两者的差值来实现区域土壤保持量的空间定量化测算 ^[41] 。	$A_s = A_p - A_a$ $A_p = R_i \times K_i \times L_i \times S_i$ $A_a = R_i \times K_i \times L_i \times S_i \times C_i \times P_i$ 式中: A_s 为单位面积土壤保持量, $t/(hm^2 \cdot a)$; A_a 为单位面积实际土壤侵蚀量, $t/(hm^2 \cdot a)$; A_p 为单位面积潜在土壤侵蚀量, $t/(hm^2 \cdot a)$; R_i 为第 i 个网格单元的降雨侵蚀因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$; K_i 为第 i 个网格单元的土壤可蚀性因子; L_i 和 S_i 分别为第 i 个网格单元的坡度、坡长因子; C_i 和 P_i 分别为植被覆盖管理因子和土壤保持措施因子。
产水量 Water yield	基于水量平衡原理采用各栅格单元的降水量和实际蒸散后的水量的差值来表征产水量能力。其中,潜在蒸散发量、实际蒸散发量等模型相关参数的设置和选取,主要参考已有相关研究 ^[42] 及 InVEST 使用手册得到。	$Wi = (1 - \frac{AET(i)}{P(i)}) \times P(i)$ 式中: W_i 为第 i 个栅格的产水量,用以表征栅格单元的潜在水源涵养功能; $AET(i)$ 为第 i 个栅格的年实际蒸散发量; $P(i)$ 为第 i 个栅格的年降水量。
生境质量 Habitat quality	对区域的生境质量进行空间定量化评估,综合考虑威胁源的影响、生境与威胁源的距离和土地覆盖类型对威胁的敏感性这三方面的影响因素来构建生境质量指数。其中,生境适应性指标、生境威胁指数、半饱和常数等参数主要参考已有研究成果 ^[43] 及 InVEST 模型参考手册。	$Q_{x,j} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{x,j}^z}{D_{x,j}^z + K^z} \right) \right]$ 式中: $Q_{x,j}$ 为第 x 个栅格单元中第 j 种土地利用类型的生境质量指数; $D_{x,j}$ 为第 x 个栅格单元中第 j 种土地利用类型的生境退化度; H_j 为土地利用类型的生境适应度; k 为半饱和常数,取最大退化度的一半; z 为归一化常数,取模型默认的参数。
粮食供给 Grain supply	区域的粮食供给功能与粮食产量存在显著线性相关性 ^[44] 。本研究结合各县域的粮食产量、耕地分布与 NDVI 数据,实现 2000—2020 年 1 km 栅格的中国粮食供给的空间定量化测度。	$F_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times F_{sum}$ 式中: F_i 为第 i 个栅格的粮食总产量; $NDVI_i$ 为耕地上第 i 个栅格的 NDVI 值; $NDVI_{sum}$ 为某县域单元耕地上 NDVI 之和; F_{sum} 为某县域单元的粮食总产量。

域的总个数; $\bar{x}$ 为县域观测值的平均值; x_j 和 x_i 分别为在 j, i 位置的观测值; W_{ij} 为 i 和 j 之间的空间权重。

2.3.4 地理加权回归模型

地理加权回归(GWR)是一种局部空间回归分析模型,通过模型参数在空间上的变化实现对空间数据的局部空间非平稳性的探测,常用于探究空间维度下不同影响因素的空间分异性特征^[46-47]。GWR模型的计算公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_m(u_i, v_i)X_{im} + \delta_i,$$
$$i=1, 2, \cdots, n$$

(9)

式中: Y_i 为生态系统健康指数; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距项;

(u_i, v_i) 为县域坐标; X_{im} 为第 i 个县域解释变量的数值; $\beta_m(u_i, v_i)$ 为第 i 个县域第 m 个影响因素的估计系数; m 为影响因素个数; δ_i 为随机扰动项。

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年自然生态系统健康指数时空变化

2000、2010 和 2020 年长江经济带自然生态系统健康的时空演变结果见图 3。可见:2000、2010 和 2020 年长江经济带自然生态系统健康指数平均值分别为 0.651、0.649 和 0.643,表明研究期间长江经

济带自然生态系统健康指数整体表现出逐步下降的基本趋势。总体来看,2000—2020年,长江经济带自然生态系统健康指数下降区域占区县总数的20.23%。其中:长江经济带全域自然生态系统健康以“中值”和“较高值”等级为主,累计所占比例分别为70.43%、69.94%和57.96%;2000—2020年长江经济带自然生态系统健康处于“低值”和“较低值”类型的所占比例增加较多,分别从2000年的

5.01%、11.10%增加到2020年的16.21%、9.04%。具体而言,2000—2020年长江经济带的自然生态系统健康状况整体呈现“南部高,北部低”的空间分布格局。自然生态系统健康指数低值主要集中在下游的苏州市、上海市、南通市和如东县等地区,而自然生态系统健康指数高值主要集中在湖北省、湖南省、江西省和浙江省等生态大省上的松阳县、南漳县、崇义县和双牌县等县域。

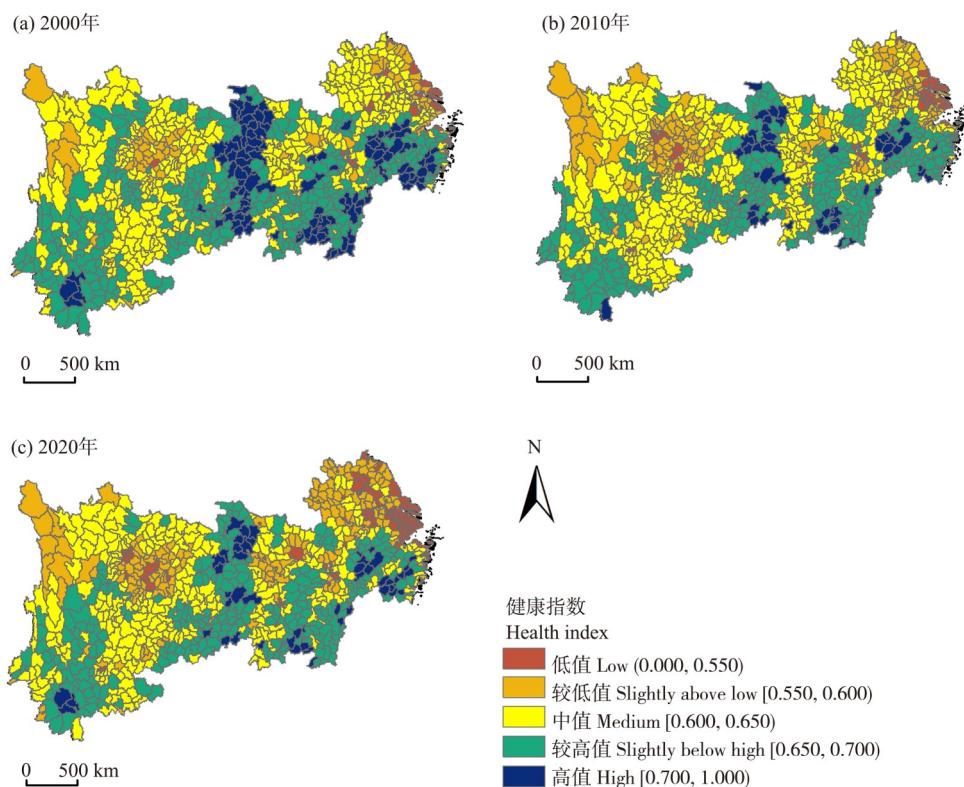


图3 自然生态系统健康指数时空分布

Fig. 3 Spatial distribution of natural ecosystem health indexes

3.2 综合生态系统服务时空变化

2000、2010和2020年长江经济带综合生态系统服务的时空演变结果见图4。可见:2000、2010和2020年的综合生态系统服务指数平均值分别为0.435、0.411、0.393,表明研究期间长江经济带综合生态服务总体表现为逐步下降的基本趋势。总体来看,2000—2020年,长江经济带综合生态系统服务指数下降区域占区县总数的26.92%。其中:长江经济带全域综合生态系统服务呈现从“中值”和“较高值”类型为主转向以“低值”和“中值”类型为主的演变趋势,2000—2020年长江经济带综合生态系统服务处于“低值”和“较低值”类型的所占比

例增加较为明显,分别从2000年的8.74%、19.19%增加到2020年的30.06%、24.80%。具体而言,研究期间长江经济带生态系统健康总体呈现“南高北低”的空间分异格局。长江中游地区整体生态系统服务指数都较高,大部分区域的综合生态系统服务指数都 >0.45 ,其中,综合生态系统服务的高值主要分布在中游的桃源县、安化县和下游南部的遂昌县、开化县等地区,而综合生态系统服务的低值主要分布在长江下游的苏州市、江阴市和上海市等地区。

3.3 生态系统健康指数时空变化

2000、2010和2020年长江经济带生态系统健康

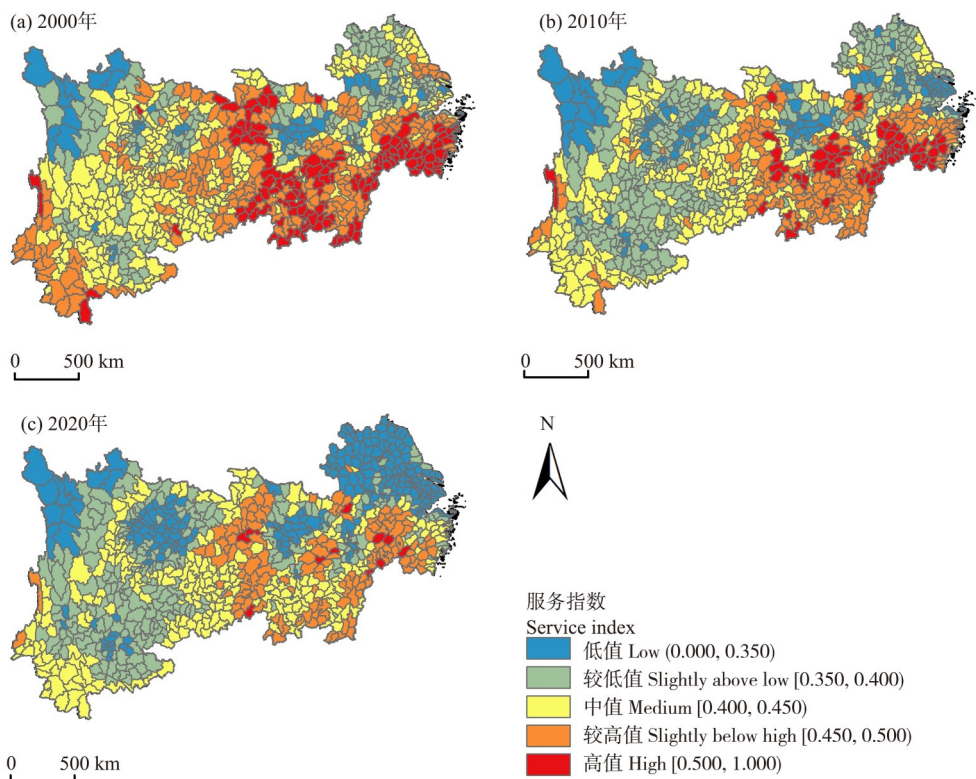


图4 综合生态系统服务指数时空分布

Fig.4 Spatial distribution of integrated ecosystem service indices

的时空演变结果见图5和表3。可见:2000、2010和2020年长江经济带的生态系统健康指数平均值分别为0.588、0.579、0.569,表明研究期间长江经济带生态系统健康指数整体呈现逐渐下降的趋势。总体来看,2000—2020年,长江经济带生态系统健康指数下降区域占区县总数的22.00%。其中:长江经济带生态系统健康以“中值”和“较高值”类型为主,累计所占比例分别为63.56%、64.05%和56.19%。2000—2020年长江经济带“低值”和“较低值”类型增加较为明显,分别从2000年的2.95%、4.81%增加到2020年的13.56%、16.21%。具体而言,研究期间长江经济带生态系统健康指数具有明显的空间异质性,呈现“南部高,北部低”的空间分布格局,与生态系统自然健康指数空间分布具有一致性。2000—2020年长江经济带的高健康主要分布在长江中游和浙江省的鹤峰县、永顺县、青田县和永嘉县等地区;较高健康主要分布在长江上游的盐源县、会理县和盐边县等地区;中等健康主要分布在下游北部的凤阳县、嘉山县、怀远县和上游的阿坝县、红原县、松潘县等地区;较低健康主要分布在上游和下游北部的

巴塘县、里塘县、石渠县和泰兴县等地区;低健康主要分布在下游北部的上海市及其周边地区。

3.4 生态系统健康空间自相关分析

自相关分析结果表明长江经济带生态系统健康的全局莫兰指数均为正值,分别为0.252、0.373、0.357,在0.001水平上显著。长江经济带生态系统健康在空间上具有较强的正相关性,相邻县域的生态系统健康存在着显著的相关性,集聚程度呈现先增强再减弱的趋势。

进一步分析生态系统健康水平在空间上的集聚态势,2000、2010和2020年长江经济带生态系统健康的LISA聚集分布情况见图6。可见:长江经济带生态系统健康属于高-高集聚类型的县域单元数量最多,占到总数的22.00%、22.10%和21.32%,主要集中在中游的宁都县、石城县、瑞金县和下游的文成县、云和县、平阳县等地区;属于高-低和低-高集聚的县域单元呈零散分布,分布在中游和下游的上饶市、玉环县、乐昌县等地区;属于低-低集聚的县域单元数量较多,分别占12.67%、16.31%、12.87%主要分布在下游北部的东海县、铜山县和灌云县等地区。

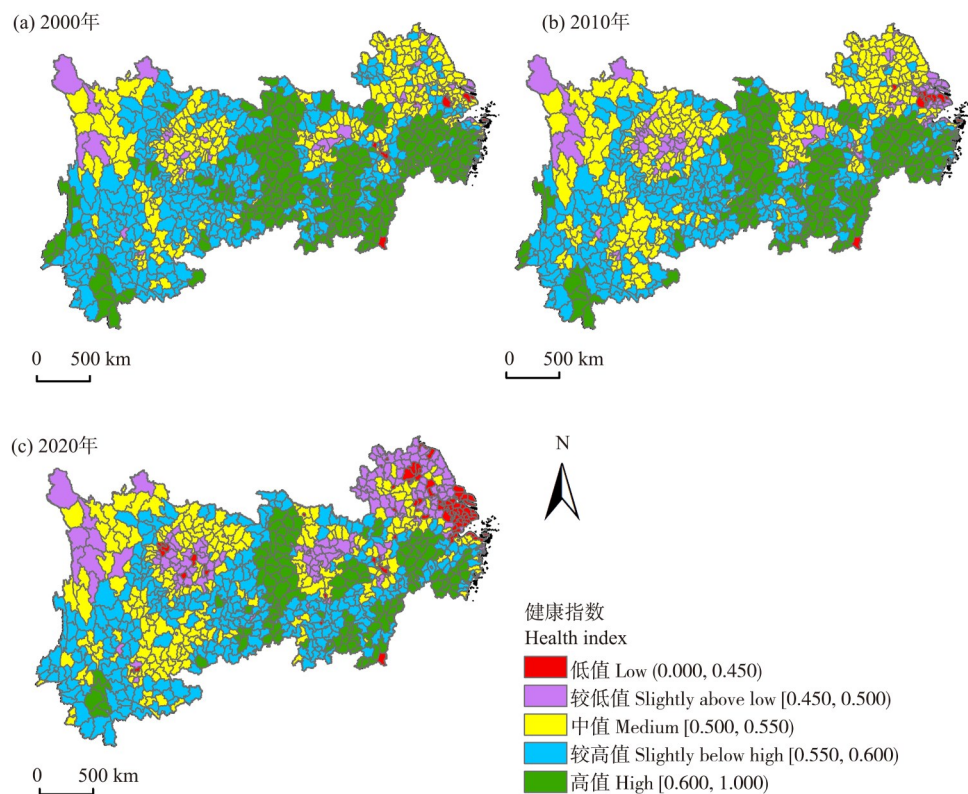


图 5 长江经济带生态系统健康时空分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecosystem health in the Yangtze River Economic Zone

表 3 2000、2010 和 2020 年长江经济带县域生态系统健康类型统计结果

Table 3 Statistics on ecosystem health types of counties in the Yangtze River Economic Zone in 2000, 2010 and 2020

年份 Year	低健康类型 Low health		较低健康类型 Slightly above low health		中等健康类型 Medium health		较高健康类型 Slightly below high health		高健康类型 High health	
	县域个数 No. of counties	比例/% Percentage	县域个数 No. of counties	比例/% Percentage	县域个数 No. of counties	比例/% Percentage	县域个数 No. of counties	比例/% Percentage	县域个数 No. of counties	比例/% Percentage
2000	30	2.95	49	4.81	288	28.29	359	35.27	292	28.68
2010	27	2.65	83	8.15	329	32.32	323	31.73	256	25.15
2020	138	13.56	165	16.21	265	26.03	307	30.16	143	14.05

3.5 生态系统健康的影响因素分析

3.5.1 因子探测分析

因子检测分析结果如表 4,可见,不同影响因素的 P 值均 <0.05 ,说明各变量对生态系统健康变化均有显著影响。根据 q 值大小,将各驱动因子对生态系统健康变化的解释力排序,不难发现,植被覆

盖、城镇化、人口密度和高程是长江经济带生态系统健康的主要影响因素。

3.5.2 主要影响因素的空间异质性特征

基于地理探测器模型探测结果发现,植被覆盖、城镇化、人口密度和高程是长江经济带生态系统健康的主要影响因素。在此基础上,本研究采用

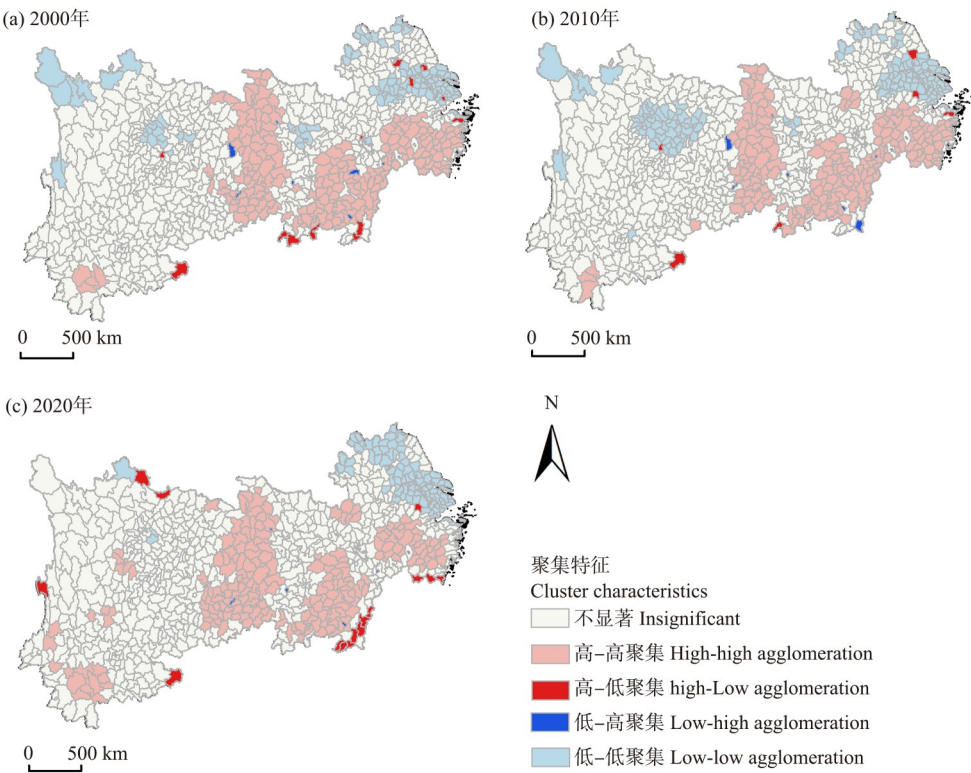


图6 2000、2010和2020年长江经济带生态系统健康LISA集聚图

Fig. 6 LISA clustering map of ecosystem health in the Yangtze River Economic Zone in 2000, 2010 and 2020

表4 初选因子的地理探测器结果

Table 4 Geodetector results for the primary selection factor

统计值 Statistical value		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
q值	q-value	0.090	0.063	0.411	0.340	0.140	0.301	0.354	0.370	0.280
P值	P-value	0.000	0.437	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注：X1~X9分别为年均降雨、年均气温、植被覆盖、高程、水网密度、人均GDP、人口密度、城镇化和路网密度。
notes: X1 to X9 are the mean annual average precipitation, mean annual average temperature, vegetation coverage, elevation, density of water network, per capita GDP, population density, urbanization and density of road network, respectively.

地理加权回归模型来探究这4个主要影响因素对长江经济带生态系统健康影响的空间异质性特征。在运用地理加权回归模型探究其空间分异之前,先对这4个影响因素进行多重共线性检验,以避免不同影响因素直接出现共线冗余问题,探测结果表明,植被覆盖、城镇化、人口密度和高程这4个影响因素的方差膨胀因子(VIF)分别为1.547、2.573、2.859和1.147,可见,4个影响因素的VIF值均<10,表明这4个影响因素均通过了多重共线性检验,可以进行地理加权回归模型的分析。

2020年长江经济带生态系统健康主要影响因素的GWR探测结果见图7。结果表明:整体上,长

江经济带各主要影响因子存在明显的空间异质性特征,不同因子对生态系统健康的影响存在较大差异,其中,植被覆盖(X3)和高程(X4)主要体现为正向影响,人口密度(X7)和城镇化(X8)主要体现为负向影响。不同影响因素的空间分异特征及其可能的原因如下:

1)植被覆盖对长江经济带的生态系统健康整体呈现较明显的正向促进作用。植被覆盖是改善区域碳循环、水循环和生态系统稳定性的重要因素,能够有效提高生态系统活力、恢复力和各类服务功能,对促进区域生态系统的健康发展具有重要作用。具体而言,植被覆盖具有保持水土的重要功

能,其覆盖度的提高能够显著改善区域土壤结构,降低土壤流失的强度,从而提升生态系统的土壤保持和碳固存能力。同时,增加植被覆盖有利于促进区域生物多样性发展,进而提升生态系统的自我修复能力,从而促进生态系统活力和恢复力的大幅提升。从空间分布上,植被覆盖因子对长江经济带生

态系统健康的驱动强度总体呈现出由南向北递减的趋势,这可能是由于南部和中部地区有广阔的森林,这些地区的植被覆盖良好,能够保障该区域具有良好的生态系统活力和恢复力,同时促进区域碳固存、土壤保持等生态系统服务功能的协调可持续,进而呈现出显著的正向促进作用。

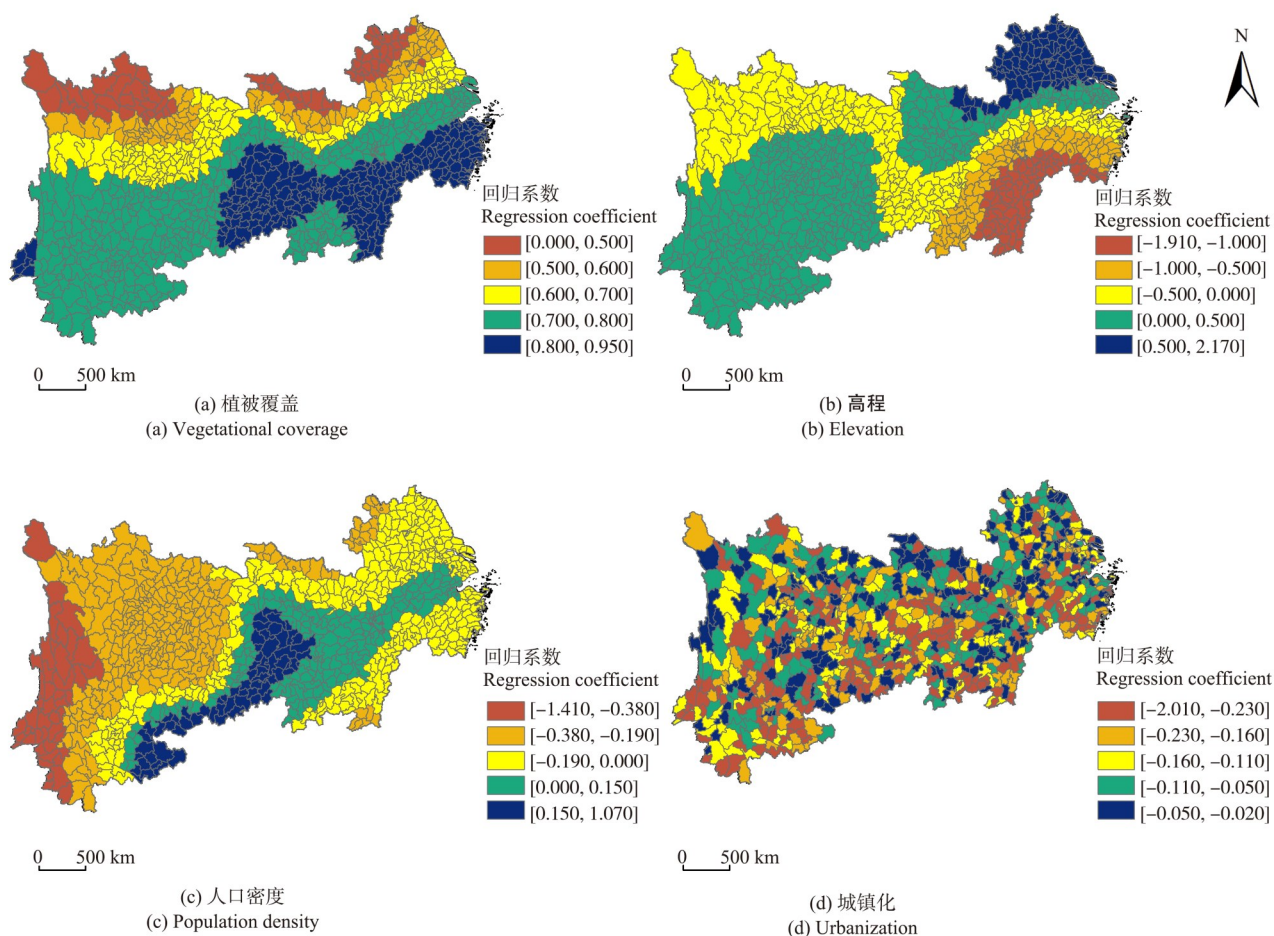


图 7 2020 年长江经济带生态系统健康主要影响因素的 GWR 探测结果

Fig. 7 GWR Detection of the Main Factors Influencing Ecosystem Health in the Yangtze River Economic Zone in 2020

2) 城镇化对长江经济带生态系统健康整体呈现一定的负向抑制作用。长江经济带作为中国快速城镇化的典型代表,近几十年来,城镇化进程的快速推进,带来了社会经济的高速增长,与此同时,区域的国土空间格局发生了显著的变革,土地利用格局的剧烈演变带来各种土地利用冲突与矛盾加剧,进而导致了区域生态系统的稳定性与抗干扰能力受到严重挑战。此外,快速的城镇化进程所带来城市建设用地的快速扩张,区域景观格局破碎化问题日益突出,对生态系统的完整性和结构稳定性带

来一定的干扰,严重威胁到区域生态系统的各种服务供给,进而改变了区域生态系统的健康状况以及空间演化过程,最终影响到生态系统活力、组织结构、恢复力以及生态系统服务功能。具体而言,城市扩张侵占了大量可提供多种生态系统服务的生态用地(林地、草地、湿地和水域等),土地利用类型的转变和土地破碎化导致区域景观连通性以及生态系统服务功能大幅下降,致使区域内生态系统活力、生态系统组织结构以及生态系统服务功能的明显减少,进而对区域内整体的生态系统健康产生一

定的负面影响。

3)人口密度对长江经济带生态系统健康整体呈现为负向抑制作用。近几十年来,长江经济带的城镇化进程带来了城市空间的快速扩张,城镇中心拥有大量的医疗、教育和就业等各种社会资源,且城市的生活、休闲、娱乐等各类基础设施完善,致使城镇中心吸引了大量的人口集聚。农村人口大量涌入城镇中心,进而带来城市内部各项经济活动更加繁荣,也带来城镇土地开发需求的大量增长,城市居民的快速增长直接导致了城镇的人口承载压力不断攀升,导致城市中心的人口集聚性与日剧增,人口密度的增加直接带来了城市热岛效应、土壤侵蚀和生物多样性丧失等一系列生态问题,甚至导致生态系统结构和功能的严重破坏,威胁区域生态系统的稳定性及生态系统健康。整体上,人口密度因子对生态系统健康的整体空间驱动特征呈现出负向影响,但有中游和下游的少部分地区呈现出正向影响,这可能是由于这些地区处于中国的粮食主产区,虽然这些地区的社会经济和城镇化水平较高,但以农业空间为核心的土地利用格局对区域的生态系统健康具有正向的促进作用,进而导致该地区的人口密度对生态系统健康呈现出一定程度的正向影响。

4)高程对长江经济带生态系统健康的影响主要呈现为正向驱动作用。随着高程的增加,区域开展城市建设和农业活动的难度攀升,故高程越大的地区受人为干扰的程度越小,人类活动对生态系统的稳定性和抗干扰能力的威胁也较小,进而导致该区域的生态系统较为稳定,有利于生态系统的快速

恢复和生态系统健康的保持,因此高程与生态系统健康往往呈现出正向相关的基本态势。此外,还有部分地区高程因子对生态系统健康的影响呈现为负向影响,这可能是由于高程的增长往往带来区域内地形坡度的显著攀升,而随着坡度的增加,区域内的水土保持面临的挑战也不断增大,容易受到短时强降雨的冲刷,而导致土壤侵蚀的不断增加,进而威胁到区域的土壤保持能力和水源涵养等生态系统服务功能。整体上,高程因子对生态系统健康的驱动强度存在明显的空间异质性特征,其中,高程对生态系统健康呈现出正向影响的地区主要分布于长江经济带下游的北部,该地区以平原为主,且高程整体均较低,该地区的人为活动干扰较为剧烈,城镇建设与农业活动较为发达,导致区域内的生态系统健康较易受人类活动的干扰,进而导致该地区的生态系统健康较低。

3.5.3 精度对比及交叉验证

为了验证地理加权回归模型的优势性,本研究对比分析了OLS模型和GWR模型对长江经济带生态系统健康影响因素揭示的拟合程度,并通过 R^2 、调整后 R^2 、AICc值这3个指标来表征OLS模型和GWR模型的拟合效果。OLS模型和GWR模型的拟合精度如表5所示,GWR模型的 R^2 值、调整后 R^2 、AICc值分别为0.641、0.632、-2 961.2,优于OLS模型的相应值,可见,GWR模型在探究长江经济带生态系统健康影响的空间异质性特征具有更优的效果。因此,本研究采用GWR模型来探究长江经济带生态系统健康影响因素的空间异质性特征。

表5 OLS与GWR对比结果
Table 5 Comparison results of OLS and GWR

模型 Model	拟合 R^2 Fitted R^2	校正后的 R^2 Adjusted R^2	AICc
OLS	0.414	0.399	-1 948.4
GWR	0.641	0.632	-2 961.2

此外,为了更好地验证长江经济带生态系统健康的影响因素探测结果的可靠性,本研究采取地理探测器模型和地理加权回归模型进行交叉验证来检验其主要影响因素的准确性。其中,前文研究发现,地理探测器探测结果表明,植被覆盖、城镇化、

人口密度和高程这4个因子是长江经济带生态系统健康的主要影响因素,而前文主要采取地理加权回归模型来探究其主要影响因素的空间分异特征,借鉴相关文献^[48]的做法,采取地理回归模型对不同影响因素的回归系数均值来表征其影响的程度,通过

对比各影响因素回归系数均值的绝对值大小,分析不同影响因素对长江经济带生态系统健康的影响程度。植被覆盖、城镇化、人口密度和高程的回归系数的均值分别为0.71、-0.28、-0.21和0.09,可见,采用地理加权回归模型对长江经济带生态系统健康的影响因素探测结果表明,不同影响因子对长江经济带生态系统健康的影响程度呈现出:植被覆盖(X3)>城镇化(X8)>人口密度(X7)>高程(X4),探测结果与地理探测器模型的排序相一致(表4)。因此,地理探测器模型与地理加权回归模型的交叉验证结果表明,采用地理探测器和地理加权回归模型相结合的方法,可以有效地探究长江经济带生态系统健康主要影响因素及其空间分异特征,该方法可以准确地筛选出主要的影响因素,且探测结果具有可靠性和准确性。

4 讨论

4.1 优势及不足

已有研究^[6-12]基于区域特殊的自然环境状况,构建不同的评估模型对不同区域生态系统健康进行空间量化评估,但对区域生态系统健康的评估框架侧重于自然生态系统健康状态的评价,缺乏与社会维度的耦合关联研究^[11-13]。鉴于此,本研究将生态系统服务纳入到生态系统健康的评估框架中,运用InVEST模型量化测度长江经济带的综合生态系统服务,进而构建基于VORS的长江经济带生态系统健康评估模型,并从县域尺度揭示了长江经济带2000—2020年的生态系统健康时空格局特征,可为长江经济带制定差异性、精细化的生态管理策略提供依据。本研究表明,近20年来长江经济带的生态系统健康状况有所下降,与王文丽等^[49]基于市域尺度研究结论相一致。此外,本研究基于地理探测器模型,从自然和人为2个维度筛选长江经济带生态系统健康的主要影响因素,并结合地理加权回归模型,探究长江经济带生态系统健康主要影响因素的空间分异特征,深入分析了不同影响因素在县域尺度上的空间异质性特征。结果表明,与其他区域生态系统健康研究相比,降水(X1)和气温(X2)对长江经济带生态系统健康的影响并不显著,而人口密度(X7)和城镇化(X8)与生态系统健康呈显著负相关,可见,以人口和城镇化等为代表的人类活动是影响长江经济带生态系统健康变化的关键因素。

然而,本研究虽然考虑生态系统服务功能的耦合关联,并构建了VORS模型的生态系统健康评估体系,在一定程度上丰富了区域生态系统健康评估的理论和方法,但仍存在以下3点不足之处:1)仅选取了水源涵养、土壤保持、生境质量、粮食供给和碳固存这5种典型的生态服务功能来表征长江经济带的综合生态系统服务功能,测度得到的综合生态系统服务的评价结果可能并不全面,无法完全反映区域的生态系统供给能力;2)长江经济带生态系统健康的内在机理是十分复杂的,本研究主要采用地理探测器和地理加权回归模型,仅简单从正、负向影响来解析长江经济带生态系统健康的主要影响因素,缺乏对不同年份的生态系统健康驱动机制的分析,无法准确揭示长江经济带生态系统健康的长期动态演化机理;3)长江经济带作为一个城市群复合生态系统,区域的生态系统健康状况受到多种因素的综合影响,本研究主要是基于VORS模型来量化评估其生态系统健康的时空格局,仅从活力、组织、恢复力和生态系统服务4个维度来构建生态系统健康的评估框架,可能导致基于该模型评估的生态系统健康状况与实际情况存在一定误差。

4.2 政策启示

长江经济带的生态系统健康状况较为严峻,且受植被覆盖、高程、人口密度、城镇化等多方面因素的综合影响。因此,因地制宜地制定科学合理的分区优化策略,并通过多层级的生态管理策略,实现区域生态系统健康的有效提升,进而推动长江经济带生态系统健康的科学管理。具体的政策建议如下:

1)构建多样化生态修复模式,实施差别化生态管理策略。因地制宜地构建多样化的生态修复模式,在生态系统健康状况良好且无明显恶化趋势的区域,如长江中游和浙江省的鹤峰县、永顺县、青田县和永嘉县等地区,要立足区域的生态系统健康现状,减少人为活动的过度干扰,发挥生态系统自身的生态保育、生态屏障和自我修复功能,保障区域生态系统健康地可持续发展;在生态系统健康状况一般的区域,如下游北部的凤阳县、嘉山县和怀远县等地区,要着力缓解人类活动对生态系统的干扰,可考虑增加植被覆盖、保护现有生态用地等措施,并辅以多元化的生态补偿工程,促进生态系统的活力、恢复力的稳固提升,以缓解区域生态系统

健康的恶化;针对生态系统状况差的区域,特别是近年来生态系统健康发生逐年恶化的地区,如下游北部的城镇中心及其周边地区,坚持以保护生态为重要抓手,重点加强生态建设和生态保护,采取积极主动的人为干预来重塑区域生态系统,推进区域湿地、湖泊、森林和绿地等生态用地的生态修复与保护。

2)积极推动社会生态系统的协同发展,协调城市建设与生态保护矛盾冲突。在长江经济带未来的国土空间规划中,应立足新发展格局理念,从整体性和系统性视角构建主体功能明显、优势互补、高质量发展的国土空间保护与开发格局。一方面,长江经济带作为一个城市群复合生态系统,城市群内部的区域差异及其空间关联错综复杂,可立足新型城镇化战略的发展契机,推动社会生态系统的协同发展,促进生态系统服务功能和生物多样性的稳步提升,增强区域生态环境承载力。另一方面,协调区域城市建设与生态保护的矛盾冲突,构建人地协调的可持续发展战略。在长江经济带未来的城市建设规划过程,要综合考虑区域的生态脆弱性、土地利用方式和生态系统健康状况,尽量避免城镇建设用地的无序扩张,减少对生态用地的侵占,加强对城市林地、草地、水域等绿色生态用地的保护与修复,并注重土地利用效率的提高和绿色基础设施的完善,逐步提高生态系统的结构和功能。

3)厘清生态系统健康演化机理,构建多维度的生态补偿制度。厘清不同地区生态系统健康的演化机理,尝试探索“横向+纵向”的多层次、多维度的生态补偿机制及生态产品价值实现路径。一方面,基于长江经济带生态系统健康影响因素的空间分异特征,识别区域生态系统健康的关键影响因素,开展差异化的人为干预模式,限制城镇空间的不合理开发,并积极采取山、水、废弃地修复等措施对区域内生态破坏严重的地区进行生态恢复,从而扩宽绿色生态空间,提升生态系统的完整性。另一方面,政府应进一步构建和完善生态保护补偿机制与生态产品价值实现路径,采用横向补偿和纵向补偿相结合的模式,开展区域内和跨区域的生态补偿,厘清生态保护补偿的补偿对象、补偿力度和补偿手段,以政府财政转移支付为引导,促进社会资本与各部分积极参与,拓展生态补偿的模式与途径,切实给予生态供给区以经济补偿,协调生态补

偿区与生态受偿区的协调可持续发展,进而推动长江经济带绿色高质量发展。

5 结论与展望

5.1 结论

本研究基于VORS模型,并结合地理探测器模型和地理加权回归模型,探讨2000—2020年长江经济带生态系统健康的主要影响因素及其空间分异特征。主要结论如下:

1)2000—2020年,长江经济带综合生态系统服务指数、自然生态系统健康指数和生态系统健康指数总体均有所下降,呈现“南部高,北部低”的空间分异格局;

2)整体上,长江经济带生态系统健康具有较强的空间正相关性和空间集聚性特征,相邻区域生态系统健康的空间相关性显著。其中,高-高集聚主要分布在长江中下游地区的南部,高-低集聚和低-高集聚呈现零散分布,低-低集聚则主要分布在长江下游地区的北部;

3)植被覆盖度、高程、人口密度和城镇化是长江经济带生态系统健康的主要影响因素。其重要性由大到小为:植被覆盖(X3)>城镇化(X8)>人口密度(X7)>高程(X4)。其中,植被覆盖、高程对生态系统健康主要呈现为正向影响,人口密度、城镇化则主要呈现负向影响。

5.2 展望

由于数据可获取性和评估模型不完善等问题,针对长江经济带的精细化、差异化的生态管理策略还不够完善。鉴于此,在未来的研究中,可结合当前大数据挖掘、机器学习和人工智能等前沿技术,构建更为精准且完善的生态系统健康评价指标体系,准确评估长江经济带生态系统健康状况的长期动态过程与内在机理。

参考文献 References

- [1] Peng J, Wang Y L, Wu J S, Zhang Y Q. Evaluation for regional ecosystem health: Methodology and research progress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4877-4885
- [2] He J H, Pan Z Z, Liu D F, Guo X N. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 553-564
- [3] Ran C, Wang S J, Bai X Y, Tan Q, Wu L H, Luo X L, Chen H, Xi H P, Lu Q. Evaluation of temporal and spatial changes of global ecosystem

- health[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(3): 1500-1512
- [4] Luo Q L, Luo L Y, Zhou Q F, Song Y. Does China's Yangtze River Economic Belt policy impact on local ecosystem services?[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 676: 231-241
- [5] 刘嗣方. 习近平总书记关于推动长江经济带发展重要论述的内涵要义、内蕴方法及创新贡献[J]. *改革*, 2024, (2): 1-14
- LIU S F. The basic content , intrinsic methods and innovative contributions of Xi Jinping's important discourse on promoting the development of the Yangtze River Economic Belt [J]. *Reform*, 2024, (2): 1-14(in Chinese)
- [6] 张宇航, 渠晓东, 彭文启, 张敏, 张海萍, 杜龙飞, 张舒朝. 北京市河流生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5478-5489
- Zhang Y H, Qu X D, Peng W Q, Zhang M, Zhang H P, Du L F, Zhang S C. Health assessment of the stream ecosystem in Beijing, China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5478-5489(in Chinese)
- [7] 李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜娴, 巴桑. 雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 4941-4953
- Li X D, Yang Q, Liu H Q, Chao X, Yang S X, Ba S. Response of river ecosystem health status to water environmental factors in the middle reaches of Yarlung Zangbo River[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 4941-4953 (in Chinese)
- [8] Mohanty M, Tare V. Anthropogenic interventions in watersheds on river flow health: Assessment using bootstrapped principal component analysis [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2022, 148(1): 04021094
- [9] Xiao R, Liu Y, Fei X F, Yu W X, Zhang Z H, Meng Q X. Ecosystem health assessment: A comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, Eastern China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 363-376
- [10] Ran C, Bai X Y, Tan Q, Luo G J, Cao Y, Wu L H, Chen F, Li C J, Luo X L, Liu M, Zhang S R. Threat of soil formation rate to health of Karst ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 887: 163911
- [11] Shi R X, Jia Q Y, Wei F Z, Du G Z. Comprehensive evaluation of ecosystem health in pastoral areas of Qinghai-Tibet Plateau based on multi model[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101552
- [12] Zou S B, Qian J K, Xu B R, Tu Z Y, Zhang W Y, Ma X L, Liang Y. Spatiotemporal changes of ecosystem health and their driving mechanisms in alpine regions on the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109396
- [13] 张迪涛, 张鹏, 王司阳, 张亮, 常剑波. 基于微生物完整性指数的水生态系统健康评价: 以武汉市东西湖区湖泊群为例[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(6): 3055-3067
- Zhang D T, Zhang P, Wang S Y, Zhang L, Chang J B. Health assessment of aquatic ecosystem based on microbial integrity index: A case study on lakes in Dongxihu District of Wuhan [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(6): 3055-3067(in Chinese)
- [14] 苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林. 基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1270-1279
- Su Y, Xu Y X, An W H, Wang Y L, He Z C, Lou Y W, Shen A L. Assessment of ecosystem health of an urban river based on the microbe index of biotic integrity (M-IBI)[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(3): 1270-1279(in Chinese)
- [15] Li M, Luo G J, Li Y B, Qin Y, Huang J, Liao J J. Effects of landscape patterns and their changes on ecosystem health under different topographic gradients: A case study of the Miaoling Mountains in Southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110796
- [16] Wu J S, Cheng D J, Xu Y Y, Huang Q, Feng Z. Spatial-temporal change of ecosystem health across China: Urbanization impact perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 326: 129393
- [17] Zhao C, Pan T, Dou T, Liu J, Liu C, Ge Y, Zhang Y, Yu X, Mitrovic S, Lim R. Making global river ecosystem health assessments objective, quantitative and comparable [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 500-510
- [18] Xiao Z L, Liu R, Gao Y H, Yang Q Y, Chen J L. Spatiotemporal variation characteristics of ecosystem health and its driving mechanism in the mountains of Southwest China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 345: 131138
- [19] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 康俊锋. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 302-319
- Cui X Y, Fang L, Wang X R, Kang J F. Urban eco-security assessment in the urban agglomerations based on DPSIR model: A case study of Yangtze River Delta, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 302-319 (in Chinese)
- [20] Xie X, Fang B, Xu H, He S S, Li X. Study on the coordinated relationship between Urban Land use efficiency and ecosystem health in China[J]. *Land Use Policy*, 2021, 102: 105235
- [21] Lv T Y, Zeng C, Lin C X, Liu W P, Cheng Y J, Li Y B. Towards an integrated approach for land spatial ecological restoration zoning based on ecosystem health assessment [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 110016
- [22] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 45: 24-29
- [23] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16
- [24] 李凤, 周文佐, 邵周玲, 周新尧, 付小丽. 2000—2018 年西秦岭景观格局变化及生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1338-1352
- Li F, Zhou W Z, Shao Z L, Zhou X Y, Fu X L. Landscape pattern changes and ecosystem health assessment in the Western Qinling Mountains from 2000 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1338-1352(in Chinese)
- [25] 刘一鸣, 徐媛银, 曾辉. 中国东海岸带地区生态系统健康评估及其尺度依赖性[J]. *生态学报*, 2022, 42(24): 9913-9926
- Liu Y M, Xu N Y, Zeng H. Ecosystem health assessment and its scale dependence in the coastal region of the East China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24): 9913-9926(in Chinese)
- [26] Liu R R, Dong X B, Wang X C, Zhang P, Liu M X, Zhang Y. Relationship and driving factors between urbanization and natural ecosystem health in China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109972
- [27] Tsai H W, Lee Y C. Effects of land use change and crop rotation

- practices on farmland ecosystem service valuation [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110998
- [28] Wu L L, Sun C G, Fan F L. Multi-criteria framework for identifying the trade-offs and synergies relationship of ecosystem services based on ecosystem services bundles[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109453
- [29] 陈万旭, 赵雪莲, 钟明星, 李江风, 曾杰. 长江中游城市群生态系统健康时空演变特征分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 138-149
- Chen W X, Zhao X L, Zhong M X, Li J F, Zeng J. Spatiotemporal evolution patterns of ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River Urban Agglomerations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 138-149(in Chinese)
- [30] Shen W, Li Y, Qin Y C. Research on the influencing factors and multi-scale regulatory pathway of ecosystem health: A case study in the Middle Reaches of the Yellow River, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 406: 137038
- [31] Huang Y, Gan X Y, Feng Y F, Li J, Niu S F, Zhou B. A new framework for assessing ecosystem health with consideration of the sustainable supply of ecosystem services[J]. *Landscape Ecology*, 2024, 39(2): 37
- [32] 陈红莲, 李瑞, 张玉珊, 吴清林, 袁江, 高家勇. 赤水河流域不同地貌区生态系统健康对比[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1912-1922
- Chen H L, Li R, Zhang Y S, Wu Q L, Yuan J, Gao J Y. Comparison of ecosystem health in different geomorphic regions of Chishui River Basin, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1912-1922(in Chinese)
- [33] 曹德龙, 唐廷元, 林震, 徐政, 闫旭. 福建省生态系统健康程度耦合评估及其时空演化分析[J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(1): 137-145
- Cao D L, Tang T Y, Lin Z, Xu Z, Yan X. Coupled assessment and spatio-temporal evolution analysis of ecosystem health in Fujian Province [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024(1): 137-145 (in Chinese)
- [34] Xu W B, He M X, Meng W Q, Zhang Y, Yun H F, Lu Y L, Huang Z M, Mo X Q, Hu B B, Liu B Q, Li H Y. Temporal-spatial change of China's coastal ecosystems health and driving factors analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 845: 157319
- [35] 奥勇, 毋冰龙, 白召弟, 王晓峰, 陈子娴. 基于类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的粤港澳大湾区城市建成区时空动态特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(3): 513-523
- Ao Y, Wu B L, Bai Z D, Wang X F, Chen Z X. Temporal-spatial changes of urban built-up area expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area, China based on NPP-VIIRS-like night light data [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(3): 513-523 (in Chinese)
- [36] 谢坤, 丁明军, 辛良杰, 陈利文. 中国县域粮食产量的时空格局及其与经济空间关系[J]. *经济地理*, 2021, 41(11): 167-175
- Xie K, Ding M J, Xin L J, Chen L W. Spatial-temporal patterns of grain output and its spatial relationship with economic development at the county level in China[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(11): 167-175 (in Chinese)
- [37] 陈万旭, 卞娇娇, 钟明星, 曾杰, 梁加乐, 曾源源. 交通通达度对生态系统健康的影响: 以长江中游城市群为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5721-5733
- Chen W X, Bian J J, Zhong M X, Zeng J, Liang J L, Zeng Y Y. Impact of traffic accessibility on ecosystem health: A case study of the middle reaches of the Yangtze River urban agglomerations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5721-5733(in Chinese)
- [38] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68
- [39] 曾晨, 程轶蛟, 吕天宇. 基于生态系统健康的国土空间生态修复分区: 以长江中游城市群为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(12): 3118-3135
- Zeng C, Cheng Y J, Lv T Y. Research on land-space ecological restoration zoning based on ecosystem health: A case study of the urban agglomeration in the middle reaches along the Yangtze River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3118-3135(in Chinese)
- [40] Du S L, Zhou Z F, Huang D H, Zhang F, Deng F F, Yang Y. The response of carbon stocks to land use/cover change and a vulnerability multi-scenario analysis of the Karst Region in Southern China based on PLUS-InVEST[J]. *Forests*, 2023, 14(12): 2307.
- [41] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 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 C Y, Gong J, Zhang J X, Liu D Q, Ma X C. 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)
- [42] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Liu J P, Hu H Z. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614
- [43] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995—2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470
- [44] Li Y G, Liu W, Feng Q, Zhu M, Yang L S, Zhang J T, Yin X W. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158940
- [45] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134 (in Chinese)
- [46] 耿甜伟, 陈海, 张行, 史琴琴, 刘迪. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1714-1727
- Geng T W, Chen H, Zhang H, Shi Q Q, Liu D. Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi province based on GWR [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(7): 1714-1727(in Chinese)
- [47] 刘锐, 李涛, 邓辉. 甘肃省农业现代化水平时空格局与影响因素[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(3): 106-116
- Liu R, Li T, Deng H. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural modernization level in Gansu Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 106-116(in Chinese)
- [48] 孔冬艳, 陈会广, 吴孔森. 中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1116-1135

Kong D Y, Chen H G, Wu K S. The evolution of "Production-Living-Ecological" space, eco-environmental effects and its influencing factors in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(5): 1116-1135 (in Chinese)

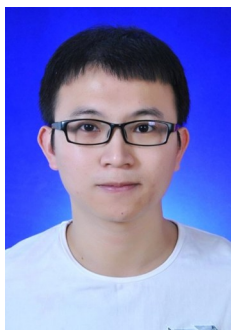
Wang W L, Zhang A L, Liu M B. Analysis on the spatial-temporal pattern of coupling between urban land use efficiency and ecosystem health in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 352-362 (in Chinese)

[49] 王文丽, 张安录, 刘蒙罢. 长江经济带城市土地利用效率与生态系统健康耦合时空格局分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 352-362

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 戴永务, 博士, 教授, 福建农林大学经济与管理学院执行院长。兼任福建省社科联第八届委员会委员、福建省高校新型特色智库集体林业改革发展研究中心主任、福建省社会科学研究基地生态文明研究中心副主任、《林业经济问题》常务副主编以及《林业经济》和《中国林业经济》编委会委员。主持国家自然科学基金面上项目 1 项, 国家社会科学基金重大项目子课题 2 项, 国家自然科学基金青年基金项目 1 项, 福建省社科规划重大项目和福建省发改委重大委托项目等纵横向课题 30 多项。出版学术专著 1 部, 发表学术论文 160 多篇, 其中 SSCI/SCI/EI 收录 20 多篇。获省级社会科学优秀成果奖二等奖 7 项, 三等奖 4 项, 梁希林业科学技术奖二等奖 2 项, 梁希青年论文一等奖 1 项。有 1 篇决策咨询报告获得国务院领导人肯定性批示、20 多篇决策咨询报告获省领导肯定性批示、4 篇决策咨询报告被中办内部刊物采用, 30 多个决策咨询报告获省级内部刊物采用。



通讯作者简介: 林金煌, 博士, 福建农林大学讲师。先后主持和参与了多项国家重点研发计划项目子课题、国家自然科学基金面上项目、福建省社科研究基地重大项目、福建省财政厅项目和南京大学博士生创新研究项目等各类科研项目, 并在 *Journal of Cleaner Production*、*Ecological Indicators*、*Remote Sensing*、*Journal of Environmental Management*、*Environmental Impact Assessment Review*、*Land Degradation & Development*、*Science of the Total Environment*、《生态学报》、《自然资源学报》、《资源科学》、《生态学杂志》、《地球信息科学学报》等国内外核心期刊上发表系列研究成果 30 余篇。