

# 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

王文丽<sup>1,2</sup>, 张安录<sup>1,2</sup>, 刘蒙罢<sup>1,2</sup>

(1.华中农业大学 公共管理学院, 武汉 430070; 2.华中农业大学 生态与环境经济研究所, 武汉 430070)

**摘要:**为深入探究区域城镇化与生态环境协调发展水平,以长江经济带为例,基于城市土地利用效率与生态系统健康视角构建相关理论框架,综合运用 SBM-Undesirable 模型、VOR 模型及耦合协调度模型测算长江经济带城市土地利用效率与生态系统健康,分析两者的耦合协调特征并识别了其协调发展问题区域。结果表明:(1) 2005—2018 年长江经济带城市土地利用效率年均值达 0.746,整体上呈波动式缓慢上升的趋势,空间集聚特征较为显著。生态系统健康得分均值为 0.473,整体呈现小幅波动的趋势,地理空间上则呈现显著的南北分异特征;(2) 城市土地利用效率与生态系统健康耦合协调度均值在 0.611~0.624 区间内小幅增长,截至 2018 年,区域内实现协调发展的市域达 92.62%,耦合结果在空间上表现为由“相对随机”向“南高北低”的分布转变;(3) 城市土地利用效率与生态系统健康耦合协调问题区域主要存在于长江经济带中下游部分市域,主要原因在于城市土地利用效率或生态系统健康单方面滞后抑制了城市协调发展水平的提升。总体而言,长江经济带城市土地利用与生态系统之间相互影响、相互促进的程度正逐步深化,交互过程中形成的耦合系统基本实现了平稳发展。

**关键词:**城市土地利用效率; 生态系统健康; 耦合协调; 长江经济带

**中图分类号:**F293.2; X171

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)06-0352-11

## Analysis on the Spatial-temporal Pattern of Coupling Between Urban Land Use Efficiency and Ecosystem Health in the Yangtze River Economic Belt

WANG Wenli<sup>1,2</sup>, ZHANG Anlu<sup>1,2</sup>, LIU Mengba<sup>1,2</sup>

(1.School of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Institute of Ecology and Environmental Economics, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to explore the coordinated development level of regional urbanisation and ecological environment, taking the Yangtze River Economic Belt as an example, constructing a related theoretical framework based on the perspective of urban land use efficiency and ecosystem health, and comprehensively using the SBM-Undesirable model, the VOR model and the coupling coordination degree model to calculate urban land use efficiency and ecosystem health in the Yangtze River Economic Belt, the coupling and coordination characteristics of the two was analysed, and problem areas of coordinated development were identified. The results show that: (1) The annual average value of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone is 0.746 from 2005 to 2018, and the overall trend is slow and fluctuating, with significant spatial agglomeration characteristics. The average value of ecosystem health score is 0.473, showing a slight fluctuation trend as a whole, and showing significant north-south differentiation in geographical space; (2) The mean value of urban land use efficiency and ecosystem health coupling coordination degree increased slightly in the interval of 0.611 to 0.624. As of 2018, 92.62% of the cities in the region have achieved coordinated development, and the results of the coupling are spatially transformed from ‘relatively random’ to ‘high in the south and low in the north’; (3) Urban land use efficiency and ecosystem health coupling coordination problem areas mainly exist in some cities in the central and lower reaches of the Yangtze River

收稿日期:2021-08-15

修回日期:2021-09-13

资助项目:国家社会科学基金重大项目(18ZDA054);国家自然科学基金(71873053)

第一作者:王文丽(1996—),女,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为土地资源经济。E-mail:749801834@qq.com

通信作者:张安录(1964—),男,湖北麻城人,博士,教授,主要从事土地资源经济研究。E-mail:zhanglanlu@mail.hzau.edu.cn

Economic Belt. The main reason is that urban land use efficiency or ecological system health is unilaterally lagging, which inhibits the improvement of the level of urban coordinated development. In general, the degree of mutual influence and promotion between urban land use and ecosystems in the Yangtze River Economic Belt is gradually deepening, and the coupling system formed in the interaction process has basically achieved stable development.

**Keywords:** urban land use efficiency; ecosystem health; coupling coordination; the Yangtze River Economic Belt

生态系统是人类得以生存繁衍的自然本底与支撑条件,城镇化则驱动着人类社会的发展演化。然而,城镇化时机与生态环境的健康状况并不完全一致,即两系统之间难以实现完全的协调发展,区域之间也不会绝对协同,而是在有序与无序、稳态与非稳态的动态涨落中进行复杂演化<sup>[1]</sup>。无序的系统则会出现土地利用低效、生态环境受损退化等问题,严重影响经济社会的可持续发展。相关研究表明,中国城镇化水平每提高 1% 所消耗的能源及所占用的建设用地面积呈比例增长,生态重建难度也越来越大<sup>[2]</sup>。在人与自然和谐共生的基本方略下,厘清城镇化过程中的人地关系以推进我国高效集约的健康可持续城镇化发展是未来研究的重难点。城市土地作为城市经济、社会与环境的空间载体,其利用效率(Urban Land Use Efficiency, ULUE)一定程度上表征着区域城镇化过程中社会、经济协调发展水平,是衡量城镇化是否集约高效的关键性指标。生态系统健康(Ecosystem Health, EH)被视为环境管理的基础和最终目的,结构和功能完整的生态系统是实现可持续发展的基本前提<sup>[3]</sup>,因此生态系统健康评估是可持续发展研究中至关重要的一环。从人地和谐的发展视角来看,高质量可持续的城镇化道路要求城市土地利用效率高效的同时,其生态系统健康亦能保持稳定。因此,城市土地利用效率与生态系统健康的协调性研究理应纳入城镇化与生态环境可持续研究系统中,这对于量化评估人地关系、推进系统实现稳态有序发展具有重要的指导价值。

当前学术界对于城市土地利用效率或生态系统健康单方面的研究相对较多。在城市土地利用效率方面,已有的研究主要集中从城镇化水平、产业整合、资源环境约束、区域差异及收敛等<sup>[4-7]</sup>视角对城市土地利用效率进行度量和评价;在研究方法上主要包括参数分析(如随机前沿分析)和非参数分析(如数据包络分析)两类主流定量分析方法,其中 DEA-SBM 模型因其考虑了松弛变量以及能够有效处理非期望产出问题等优势逐渐成为测度城市土地利用效率的代表性方法。生态系统健康评价研究主要针对单一生态系统或景观/区域生态系统开展,活力-组织-弹性

模型(VOR 模型)是最常用的评估方法<sup>[8]</sup>,也有学者基于人类社会活动与自然环境之间的互动关系采用压力-状态-响应模型(PSR 模型)或从自然-社会-经济子系统的角度建立综合指标体系评价区域生态系统健康状态。如欧维新等<sup>[9]</sup>基于 VOR 模型动态评价了长三角地区生态系统健康的时空演变特征;徐烨等<sup>[10]</sup>以 PSR 模型与景观格局指数相结合的方式构建评价指标体系,对雄安新区湿地生态系统健康状态进行评价;Meng 等<sup>[11]</sup>从资源、环境、社会和经济复合生态系统的角度采用综合指标模型对江苏省农村生态系统健康及其空间分异进行了探讨。随着城市生态文明建设思想的逐步深入,也有学者基于实证分析了城市土地利用效率与生态系统健康两者间的关系,如 Xie 等<sup>[12]</sup>以中国 31 个省(自治区、市)为研究对象,对两者之间耦合协调程度进行了初步研究,发现中国大部分地区由轻微失调向中度协调发展转变,地区之间耦合协调类型差异也较大。

综上所述,当前已有研究均为本文提供了重要的借鉴意义,但仍有进一步可拓之处。城市土地利用效率与生态系统健康耦合机理的系统分析是后续实证检验的基础,而城市内部活动最为集聚的市域尺度更能准确反映两者的耦合关系,同时对耦合结果进行问题区域识别也可进一步明晰协调发展水平不高的城市问题所在。基于此,本文在已有研究的基础上,构建城市土地利用效率与生态系统健康耦合机理框架,并以横跨中国东中西部、具有典型区域分异特征的长江经济带 108 个市域作为研究基本单元,分析该区域 2005—2018 年城市土地利用效率与生态系统健康之间的关系及其二者之间的耦合协调发展格局,并识别协调发展问题区域,为进一步协调耦合长江经济带土地利用效率与生态系统健康以推动区域统筹发展提供直接参考依据。

## 1 理论框架

### 1.1 城市土地利用效率理论内涵

从系统角度讲,城市土地利用是土地利用系统与城市系统之间进行的物质循环与能量交换,同时也包含土地利用系统内部各要素间的相互作用,因此

ULUE 是在土地利用系统自发过程与人类活动扰动下共同作用结果的体现。而 ULUE 的测度需要从更为直观的角度理解城市土地利用,即人类主体为满足自身需求将城市土地在不同部门和项目上进行分配的活动,土地的稀缺性、边际报酬递减等特性要求合理配置并高效利用城市土地。基于效率内涵,ULUE 可以理解为城市土地及其所承载的资本、劳动力等投入要素与所产出的效益之间相互关系的体现。而经济发展水平、产业政策以及环境治理能力等的不同使得地区间 ULUE 存在差异,ULUE 评价结果则可为差异化城市土地政策制定以及提升 ULUE 水平提供更有针对性的参考及建议。投入产出是人地系统中最基本的双向作用过程<sup>[13]</sup>,ULUE 测度也都基于此种投入产出的关系建立指标体系。最初的 ULUE 评价偏重于以经济效益为主的单一测度指标,而较易忽略土地利用所带来的生态效益,后随着可持续发展意识的提高,城市社会发展、生态环境保护等内容逐渐被纳入 ULUE 评价指标中,最明显的特征即在产出指标中,将由土地利用所带来的生态负效应与经济、社会效益并重纳入“投入+期望产出+非期望产出”ULUE 测算模型之中,其所追求的是经济收益和社会产出最大化及环境治理最优化。

1.2 生态系统健康理论内涵

EH 的概念并不是明晰且唯一的,相关学者从生态系统生理、人类健康、社会经济等不同角度对生态系统健康的内涵进行探讨<sup>[14]</sup>,其中 Costanza 和 Rapport 两位学者提出的概念内涵被学术界广泛认同。Costanza<sup>[15]</sup>认为,系统活力、组织和弹性是健康生态系统的必要条件,同时该系统不受外界胁迫,表现为稳定且持续的活跃状态;Rapport 等<sup>[16]</sup>则认为仅强调生态方面的内涵是不够全面的,EH 既指维持自身组织结构稳定以

及自我调节修复能力,也包含能够持续地满足人类社会合理需求的能力。基于此,后续的 EH 研究大多从结构与功能两方面在生态系统活力、组织和弹性 3 个内容的基础上进行拓展与丰富。其中,人类作为生态系统的一部分,量化人类活动、生态变化与人类健康之间的联系也是 EH 研究的一项关键任务。

尽管对 EH 的讨论尚未形成统一的观点,但本质上是对生态系统状态特征的一个系统性诊断结果,由于城市系统与土地利用系统相互作用的过程中会对生态系统产生不同程度的影响,如何基于生态学视角评价经济社会发展过程中的生态响应,即量化这种人为干扰下生态系统结构与功能的完整性应是 EH 评估的主要内容。此外,由于健康是基于人类主观期望的一个相对概念,而无绝对标准,因此,EH 评估应侧重于生态系统健康的时空动态与空间差异,比较不同节点下地区生态系统的健康状态能为地区发展提供更合理、更实用的依据。

1.3 城市土地利用效率与生态系统健康耦合机理

耦合协调是指两个或多个系统之间或系统内部相互作用而彼此影响、制约,最后达成一种良性互动的协调发展关系,其产生的基本前提是相互耦合的各因子间有一定的联系。图 1 为 ULUE 与 EH 之间交互耦合的能量与信息流通过程。ULUE 由投入、期望产出和非期望产出三部分共同决定,其组合关系通过资源利用与污染物排放对区域 EH 产生胁迫或改善作用;区域 EH 水平所决定的资源承载、生活环境等生态服务信息会不断反馈到决策部门,通过政策干预对城市土地利用起到承载或约束作用,同时与投入产出的效益水平通过市场机制共同影响对 ULUE 水平有重要作用的地区投资竞争力,最终形成耦合系统的协调或失调发展循环。具体表现在以下两方面:

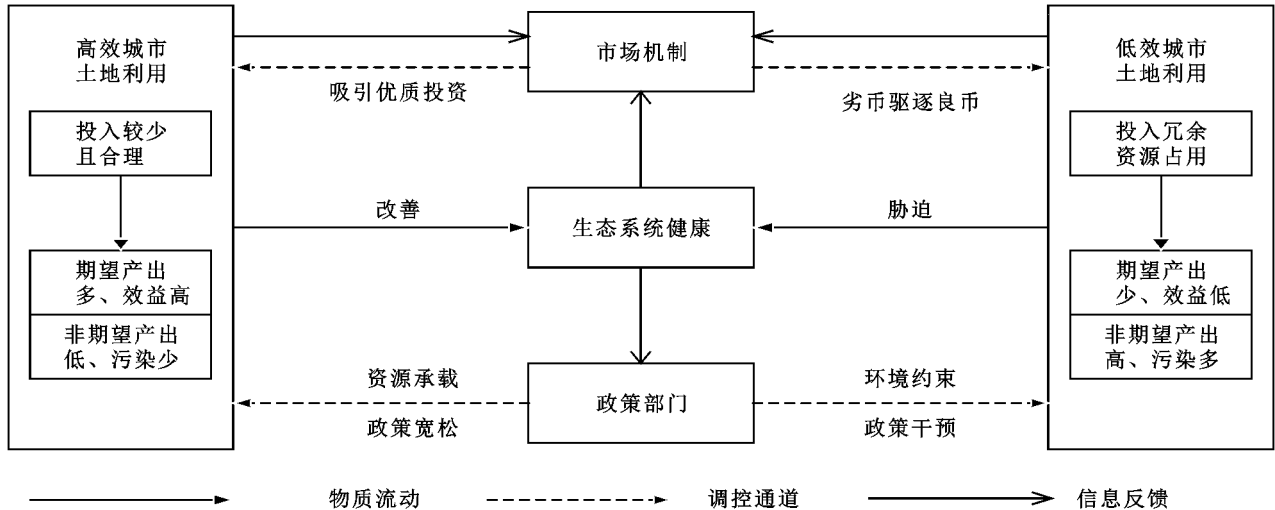


图 1 ULUE 与 EH 交互耦合机理



一方面,ULUE 与 EH 相互支撑。高水平的 ULUE 意味着城市土地利用过程中较低的投入获取了较高的收益和较少的非期望产出,较高的社会效益下会有更多的财政支持与环保投资用于增加城市绿化与推广应用绿色生产技术以直接或间接改善区域 EH;而健康的生态系统其完整的结构与功能无需外部的政策干预保护,政策环境相对宽松,生态系统良好的资源与环境容量可承载更多的生产要素和提供较多的生态服务推动绿色土地利用方式的转变以提升 ULUE;另外,低投入高收益的用地模式与污染较少且生态良好的优质环境,一定程度上使得相应的市场地租上升,在市场机制作用下,高投入低产出的低效产业被迫转型升级或被低投入高产出的高新技术产业取代,同时也会吸引更多投资与劳动力,集聚优质生产要素,为区域产业结构的优化升级提供支持,产业结构优化带来的技术效应可有效降低城市土地利用过程中的非期望产出和显著提升污染净化水平,既保证了生态系统不受外部环境胁迫,亦能推动 ULUE 的进一步提升,以此形成 ULUE 与 EH 相互促进的良性循环。

另一方面,ULUE 与 EH 相互制约。低效粗放的城市土地利用,意味着土地利用过程中出现了土地、资本等生产要素的浪费以及污染物排放过量等问题,未得到充分利用的建设用地挤占了生态用地空间,生态系统组织结构受到外界胁迫,抵抗外部干扰与自我修复等生态服务功能受损,同时污染物的过量排放进一步加大了生态系统压力,而资本冗余制约着社会经济效益的提高,用于生态系统管理与修复的财政和技术支持减少,限制了解决生态系统需求的能力,区域 EH 受损;而较弱的区域 EH 水平面临生态要素支撑能力的下降以及环境容量的缩减,生态系统自身功能下降的同时,也会引发生产、生活空间的环境恶化等问题,为保护生态环境会有必要的政策干预城市土地利用需求,限制企业选址、严肃企业生产等措施制约着城市发展与 ULUE 的提升;政策环境的限制与环境舒适度的下降,对城市投资环境竞争力产生负面影响,通过“劣币驱逐良币效应”<sup>[17]</sup>,阻碍对生态环境有着更高要求的优质企业与专业人才入驻,流失优质资金与技术储备,产业结构转型升级困难,在生态系统修复功能下降且 ULUE 提升受限的情况下较多的污染物无法得到及时净化又进一步胁迫区域 EH,形成 ULUE 与 EH 互相制约的恶性循环。

总体而言,ULUE 与 EH 在相互支撑、相互制约的竞合之中形成了紧密联系的复杂耦合系统,通过对耦合系统整体演化影响较大的子系统进行调控,推动各子系统在对立统一中相互包容最终趋于协调发展。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

2.1.1 SBM-Undesirable 模型 本研究采用 SBM-Undesirable 模型<sup>[18]</sup>对 ULUE 进行测度。假定城市土地利用系统有  $n$  个决策单元(DMU),每个决策单元有投入、期望产出和非期望产出 3 个向量,分别表示为  $x \in R^m, y^e \in R^a$  和  $y^n \in R^b, m, a, b$  分别表示各向量内要素数量。定义矩阵  $X = (x_{ij}) \in R^{m \times n}, Y^e = (y_{ij}^e) \in R^{a \times n}, Y^n = (y_{ij}^n) \in R^{b \times n}$ , 基于规模报酬可变的情况下包含非期望产出的生产可能性集合  $P$  定义为:

$$P = \{(x, y^e, y^n) | x \geq X\lambda, y^e \leq Y^e\lambda, y^n \geq Y^n\lambda, \lambda \geq 0\}$$

(1)

构建 SBM-Undesirable 公式如下:

$$\rho^* = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{a+b} (\sum_{r=1}^a \frac{S_r^e}{y_{r0}^e} + \sum_{h=1}^b \frac{S_h^n}{y_{h0}^n})}$$
$$\text{s.t. } x_0 = X\lambda + S^-; y_0^e = Y^e\lambda + S^e; y_0^n = Y^n\lambda + S^n$$
$$S^- \geq 0, S^e \geq 0, S^n \geq 0, \lambda \geq 0$$

(2)

式中: $\rho^*$  为决策单元的 ULUE 值; $S^-$ ,  $S^e$  和  $S^n$  分别为投入、期望产出及非期望产出的松弛变量; $x_{i0}$ ,  $y_{r0}^e$  和  $y_{h0}^n$  对应城市在某阶段的投入产出值; $\lambda$  为权重向量。

基于城市土地利用过程中的投入产出关系,参考已有研究成果<sup>[19-20]</sup>,构建 ULUE 评价指标体系(表 1)。投入指标方面,除土地、资本和劳动力外,将同样会影响到地区经济效率和竞争力的技术要素也纳入其中;产出指标的选择综合了经济、社会和生态三方面效益,其中绿地生态资产是基于城市绿地所产生的非市场价值(即生态系统服务价值)的考量<sup>[21]</sup>,在考虑生态正向产出的同时将工业废水排放量、工业二氧化硫排放量以及工业烟粉尘排放量作为非期望产出指标,基于绿色发展角度综合测度 ULUE。

表 1 ULUE 评价指标体系

目标层	准则层	指标层
投入	土地	建设用地面积(km <sup>2</sup> )
	资本	资本存量(亿元)
	劳动力	二、三产业职工(万人)
	技术	地方财政科学支出(万元)
		二、三产业产值(亿元)
	期望产出	绿地生态资产(万元)
产出		专利授权量(件)
		工业废水排放量(10 <sup>4</sup> t)
	非期望产出	工业二氧化硫排放量(t)
		工业烟粉尘排放量(t)

2.1.2 VOR 模型 VOR 模型基于生态活力(V)、组织(O)和弹性(R)3 个层面对生态系统质量与完整性进行评估。活力是指生态系统生产活动中的物质与能量,代表生态系统功能;组织是指描述生态系统结构的复杂性,体现景观多样性和人类活动对生态系统的影响;弹性是指生态系统对自然灾害或人类活动等外部干扰的抵抗能力或生态系统受损后自我调节的复原能力。公式如下:

$$EH=\sqrt[3]{V\cdot O\cdot R}$$
 (3)

由 EH 内涵可知,EH 评估应从生态系统本身出发,建立能够表征生态系统的整体功能状态的指标体系才是评价生态系统质量的核心内容和根本途径,而人为控制的环境变量本质上是从公共卫生的视角出发,不足以阐述生态系统的实质状态。因此,本研究基于生态学视角,构建与生态系统本身密切相关的评价指标体系,综合评估 EH 状况。

其中,归一化植被指数(NDVI)被广泛地应用于评估植被的初级生产力,其值越大,生态系统生产力越高,可用来量化生态系统活力;

生态系统组织的量化通常从景观异质性(LH)、景观连通性(LC)和景观形状(LS)3 个方面选取景观指标。参考已有研究<sup>[22-23]</sup>,本文使用香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)和面积加权分维数(AWMFDI)来计算景观异质性,用景观分割指数(DIVISION)、景观散布并列指数(IJI)和景观蔓延度指数(CONTAG)计算景观连通性,用边缘面积分维数(PAFRAC)计算景观形状。各指标采用熵值法赋权,生态系统组织计算公式如下:

$$\begin{aligned} O &= 0.34LH + 0.49LC + 0.17LS \\ &= 0.14SHDI + 0.15SHEI + 0.05AWMFDI + \\ &\quad 0.08DIVISION + 0.12IJI + 0.29CONTAG + \\ &\quad 0.17PAFRAC \end{aligned}$$
 (4)

生态系统弹性的评估可基于其对外界干扰的抵抗力( $R_1$ )与自我修复的复原力( $R_2$ )两方面考虑,参照相关研究<sup>[23-24]</sup>,生态系统弹性计算公式如下:

$$R=0.6\cdot R_{1i}\cdot \sum P_i+0.4\cdot R_{2i}\cdot \sum P_i$$
 (5)

式中: $P_i$  为各景观类型面积比; $R_{1i}$  和  $R_{2i}$  分别为第  $i$  种景观类型的抵抗力系数和复原力系数,系数设置见表 2。

表 2 土地利用类型生态系统弹性系数

类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
$R_1$	0.5	1.0	0.7	0.8	0.3	0.6
$R_2$	0.3	0.5	0.8	0.7	0.2	0.4

2.1.3 耦合协调度模型 基于 ULUE 与 EH 耦合机理分析可知,两系统彼此独立又相互作用。因此,本研究借助物理学中容量耦合系数模型,以揭示城市土

地利用系统与生态健康系统之间的相互影响的内在耦合机制。基于已有研究,构建耦合协调度模型<sup>[25-26]</sup>,即式(5—7):

$$C=\left[2\frac{ab}{(a+b)^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
 (6)

式中: $C$  为 ULUE 与 EH 的耦合度,更多的用来反映两系统要素的相似性; $a, b$  分别为 ULUE 与 EH 的综合评价指数值。

$$T=ma\cdot nb$$
 (7)

式中: $T$  为 ULUE 与 EH 之间的综合协调指数; $m, n$  为对应要素权重,考虑到生态文明建设的逐步深入,未来将更加重视生态环境保护,长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”的战略导向也表明生态系统健康具有更高的权重,参考相关研究<sup>[12,27]</sup>,本研究将  $m, n$  分别赋值 0.4、0.6。

$$D=\sqrt{C\cdot T}$$
 (8)

式中: $D$  为 ULUE 与 EH 之间的耦合协调度, $0\leq D\leq 1$ , $D$  越大表明耦合协调水平越高。参考相关研究<sup>[27-28]</sup>,二者之间的耦合协调类型可以分为表 3 中的几种基本类型。

表 3 耦合协调类型及划分依据

耦合协调度	发展类型
0.000~0.199	严重失调衰退
0.200~0.299	中度失调衰退
0.300~0.399	轻度失调衰退
0.400~0.499	濒临失调衰退
0.500~0.599	初级协调发展
0.600~0.699	中级协调发展
0.700~0.799	良好协调发展
0.800~1.000	优质协调发展

2.2 研究区域与数据来源

2.2.1 研究区概况 长江经济带是在长江流域的基础上考虑行政区划完整性而划定的区域,包含沪、浙、苏、皖、赣、鄂、湘、渝、川、黔和滇 9 省 2 市,共占据 21% 的国土面积,截至 2018 年末,其人口总量和地区生产总值均超全国四成。然而,由于在发展过程中高投入、高能耗的传统土地利用模式,长江经济带废水和废气排放量已达到全国总量的 44.54%,35.7%<sup>[29]</sup>,长期累积的生态环境问题已不容忽视。在“共抓大保护,不搞大开发”的发展导向和生态文明建设背景下,量化评估其土地利用效率与生态质量对推动区域高质量可持续发展具有重要的指导意义。基于数据可获得性与连贯性,本研究选取长江经济带 108 个地级及以上城市为基本研究单元,其中上游 41 个,中游 36 个,下游 31 个。

2.2.2 数据来源与处理 研究所需的社会经济数据来源于 2005—2018 年《中国城市统计年鉴》、《中国环

境统计年鉴》以及相关省份统计年鉴,部分缺失数据通过国民经济和社会发展统计公报、生态环境局官网等数据库补充,仍有个别缺失的数据采用相邻年份移动平均法进行处理;其中,为保证数据可比性,以 2005 年为基期,对二、三产业产值以及地方财政科学支出等指标进行平减处理,其中资本存量数据是对固定资产投资额进行平减处理后通过永续盘存法计算得出。土地利用覆被数据和归一化植被指数(NDVI)数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),时间节点为 2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年,其中土地利用覆被数据经重分类为 6 种土地利用类型,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,精度为 30 m;NDVI 数据基于 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,在月数据基础上采用最大值合成法生成的年度植被指数数据集。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城市土地利用效率

基于 DEA Solver Pro15.0 软件,测度长江经济带 108 个城市 2005—2018 年 ULUE 指数(图 2)。总体来看,2005—2018 年,长江经济带年均 ULUE 为 0.746,整体处于较高水平,其中下游地区年均效率值达 0.800,其次为上游、中游地区,分别为 0.750、0.689;从图形走势上看,长江经济带及其各流域 ULUE 在研究前中期均有较明显的波动,随后呈现缓慢上升的趋势,主要原因可能是因为党的十八大提出要把生态文明建设理念融入于城市经济发展的各个层面,以促进社会经济与环境保护的协调发展,该举措一定程度上促进了城市产业结构转型,城市土地利用过程中的非期望产出得到有效控制。从增长幅度上看,长江经济带 ULUE 整体增长 5.72%,其中上游地区 ULUE 提升最为明显,由 2005 年的 0.642 提高到 2018 年的 0.881,增幅达 37.23%,中下游地区变化幅度较小,分别为-4.02%、1.35%。

为更加直观地反映长江经济带 ULUE 的空间演变特征,以 2005 年、2010 年、2015 年以及 2018 年作为典型年份,借助 ArcGIS 空间分析模块,基于自然间断点分级法(Jenkes)<sup>[30]</sup>,将 ULUE 测度结果分为 5 个等级:低效、较低、一般、较高以及高效。如图 3 所示,2005—2018 年,长江经济带大多城市在不同程度上实现了自身 ULUE 水平的提升,并在上游、下游地区形成高值集聚区,区域间分异较为明显。其中,下游地区 ULUE 高值区主要集聚在苏浙沪区域,该

部分城市地理位置优越,发展水平相对较高,虹吸效应下集聚了大量优质资本及生产技术,能够有效地处理城市土地利用过程中的投入产出关系,基本实现城市产业绿色发展。而上游地区由于远离经济中心,整体发展水平相对较低,大多城市处于低投入低产出的土地利用模式,在 2005 年时区域内 ULUE 水平整体偏低,随着长江经济带发展战略的提出,以成渝为中心的城市群抓住政策机遇推动产业结构转型升级,优化土地投入结构,带动上游地区实现了 ULUE 水平的显著提升;同时,云南省因其区域自然与人文资源的独特优势,城市发展对建设用地投入依赖程度小,旅游业发展迅速,大大提高了区域资源整合利用效率,至 2018 年基本实现了省域内城市土地高效利用。与其他两个地区 ULUE 水平集聚性的特征相比,中游地区 ULUE 水平内部差异显著且波动明显。原因可能是在促进中部崛起的政策扶持下,长中游城市群集聚了大量的生产要素,在资源配置效率与产业结构协调水平存在差异的情况下,同等条件下的高投入势必带来不同的投入冗余与非期望产出问题,如武汉、南昌与长沙等中心城市虽能保持高效的土地利用水平,但未能带动周边城市形成如长三角城市群、成渝城市群等城市圈形式的高效集聚区。建设“两型社会”的提出,武汉城市群与环鄱阳湖城市群被确定综合配套改革试验区,至 2018 年,环鄱阳湖城市群 ULUE 水平有明显提升,而武汉周边城市仍需加强城市群内部技术交流与产业流通,提高资源配置效率,提升自身 ULUE 水平。

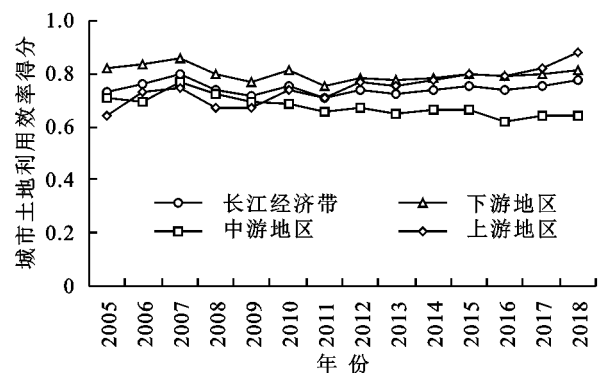


图 2 2005—2018 年长江经济带 ULUE 演变趋势

#### 3.2 生态系统健康

参照已有研究<sup>[25-26]</sup>,本研究将 EH 评估结果划分为 5 种健康状态:脆弱[0.000~0.200)、较弱[0.200~0.400)、一般[0.400~0.600)、良好[0.600~0.800)、健康[0.800~1.000]。由图 4 可知,在过去的 13 a 间,长江经济带 EH 得分均值为 0.473,呈小幅波动趋势,整体稳定在一般健康状态。分流域看,中上游地区 EH 得分超过整体均值,且有稳步提升的趋势;下游



则处于较弱的状态,在时间上呈较稳定的“V”型变化趋势。这主要是因为中上游大部分地区在《全国主体功能区规划》中属于限制开发区与禁止开发区,在其

城市土地利用开发过程中更注重兼顾生态环境,而城市发展较快的下游地区受到的人为干扰相对较多,对地区 EH 影响较大。

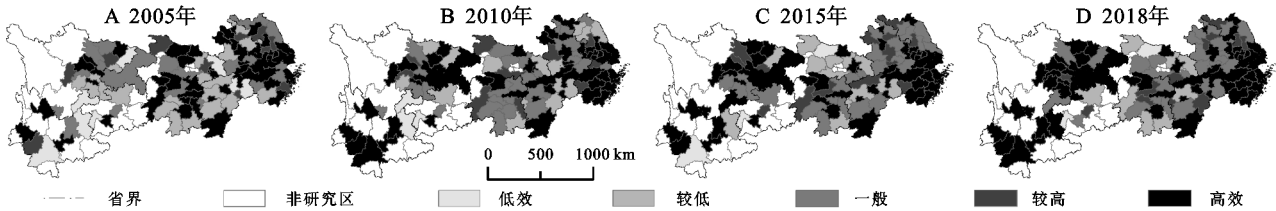


图 3 2005—2018 年长江经济带 ULUE 空间格局

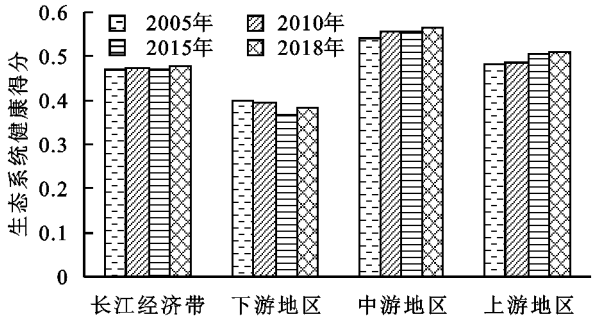


图 4 2005—2018 年长江经济带 EH 得分

从空间演变上看(图 5),2005—2018 年长江经济带 EH 整体变化不大,空间上呈较明显的“南高北低”分异特征。其中,下游地区 EH 南北差异最为明显,以六安—宁波沿线为界,沿线以北城市 EH 状况处于一般水平以下,同时也是整个研究区中 EH 得分的低值区,主要原因在于该部分区域经济相对发达,城镇化与工业化程度较高,生产、生活空间对生态空间的挤占更为严重,其生态系统组织与弹性相对较弱;而沿线以南区域自然条件相对优越,在城市规划中也注重生态系统结构完整性,其 EH 状态明显优于北部市

域,部分城市生态系统达到健康状态。中游地区 EH 基本稳定在一般与良好状态,且外围城市 EH 要优于城市群内部,武汉、南昌等中心城市生态系统由于面临的建设用地扩张与人口压力相对较大,生态用地的减少使其 EH 状况也弱于周边城市,因此未来城市的发展应更加强调集约利用建设用地,加强生态保护工程与绿化建设以缓解城市生态压力。上游地区 EH 状态的提升主要体现在成渝部分城市生态环境的改善以及云南省部分市域 EH 水平的进一步提升,而四川省北部有少部分健康得分低值区,主要因为该部分地区以山地为主的地形起伏度增加,一定程度上加剧了景观破碎化程度,影响了景观连通性。

总体而言,长江经济带 EH 状况所表现出的“南高北低”空间分异特征,一方面在于区域南部的植被覆盖度较北部更高,生态系统活力与弹性较优;另一方面,城镇化水平相对较高、人为干扰较大的城市多位于区域中北部,生态系统组织结构完整性受到相对更多的影响,从而 EH 状况相对弱于南部城市。

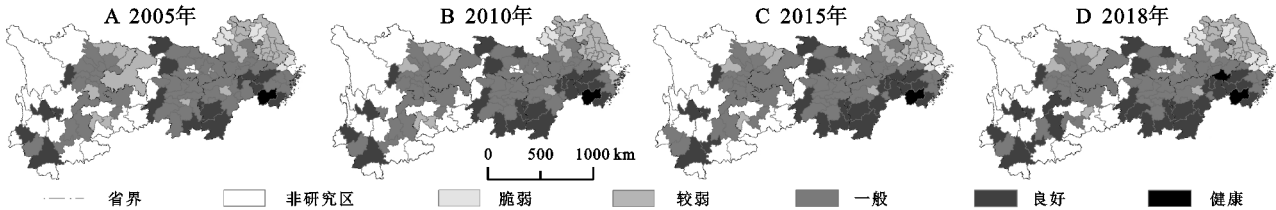


图 5 2005—2018 年长江经济带 EH 空间格局

**3.3 城市土地利用效率与生态系统健康耦合协调程度**  
**3.3.1 时空动态演进** 基于前文对长江经济带 ULUE 以及 EH 的综合评价结果,采用耦合协调模型计算两者的耦合协调度。结果表明,2005—2018 年间,长江经济带 ULUE 与 EH 耦合协调均值稳定在[0.611, 0.624],表现出小幅增长趋势,整体稳定在中级协调发展水平。其中,中游地区年均耦合协调度最高(0.640),其次为上游(0.632)、下游(0.585)。对各研究年份的协调发展程度进行统计分析发现(表 4),研究期间,长江经济带 ULUE 与 EH 耦合协调程度处于轻度协调衰退与优质协调发展之间。至 2018 年,

92.62%的市域实现了协调发展,仅 7.47%的市域处于失调状态。其中,实现良好及优质协调发展及水平的城市数量占比达 20.37%,较 2005 年增加 4.63%,该部分市域主要分布在上游地区成渝城市群及云南省域;中级协调发展水平的市域由 2005 年的 36.11%提升至 2018 年的 39.81%,主要分布在中游地区湖南、江西两省部分市域。同时,下游北部地区有少量市域仍处于轻度失调衰退阶段。总体而言,长江经济带城市土地利用与生态系统之间相互影响、相互促进的程度正逐步深化,交互耦合过程中形成的复合系统基本实现了平稳发展。

表 4 2005—2018 年长江经济带 ULUE 与 EH 耦合协调等级市域个数及占比

等级	2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%
轻度失调衰退	1	0.93	2	1.85	3	3.78	3	2.78
濒临失调	8	7.41	10	9.26	7	6.48	5	4.63
初级协调发展	43	39.81	28	25.93	35	32.41	35	32.41
中级协调发展	39	36.11	50	46.30	42	38.89	43	39.81
良好协调发展	17	15.72	18	16.67	20	18.52	21	19.44
优质协调发展					1	0.93	1	0.93

3.3.2 空间格局演化与问题区域识别 从图 6A—D 可以看出,基于 ArcGIS 软件空间分析模块,对 2005—2018 年 4 个时间节点上长江经济带 ULUE 与 EH 协调发展的空间演变情况进行分析。同时,为进一步明晰两系统交互耦合过程中部分市域协调

发展水平不高的问题所在,参照已有研究<sup>[29]</sup>,通过设立相关判别标准(表 5),对 2018 年 ULUE,EH 及其耦合协调度  $D$  计算结果进行判定并分类,识别协调发展问题区域,为推动地区协同发展提供更有针对性的依据。

表 5 问题区域类型及判定标准

判定条件 1	判定条件 2	滞后类型
$D$ 高于整体均值的 70%	ULUE 低于整体均值的 70%	效率滞后
	EH 低于整体均值的 70%	健康滞后
	ULUE,EH 均低于整体均值的 70%	效率与健康均滞后
$D$ 低于整体均值的 70%	ULUE 低于整体均值的 70%	效率滞后引起协调滞后
	EH 低于整体均值的 70%	健康滞后引起协调滞后
	ELUE,EH 均低于整体均值的 70%	效率与健康均滞后引起协调滞后

整体上,长江经济带 ULUE 与 EH 耦合协调类型在研究初期分布相对随机,而后逐渐形成“南高北低”的空间特征,该种特征差异在下游地区较为明显。较高的 ULUE 水平与良好的 EH 状况,以浙江省为主的南部区域实现了良好协调发展,其中丽水市在 2015 年以后更是达到了优质协调发展,逐步形成以丽水市为原点向北呈扇形式递降的空间格局;北部市域由于受 EH 制约,耦合协调度主要处于初级协调水平,部分 ULUE 水平较低的边缘城市则濒临失调或处于轻度失调衰退状态,也是整个研究区协调发展水平最低的区域。对 2018 年协调发展问题区域识别结果(图 6E)表明,该部分区域主要存在以下两类问题:一类是 ULUE 或 EH 单方面的滞后问题,在当前状态下未对城市发展产生较大影响但潜在影响不可忽视,表现为初级协调发展水平或濒临失调的城市大多存在该类问题,且协调发展水平在较长时期内未有明显的提升;一类是 ULUE 与 EH 单方面滞后或同步滞后并对城市协调发展产生了一定影响,仅个别市域存在该类问题,如安徽阜阳与浙江嘉兴两市的 EH 滞后问题引起了协调发展滞后,而亳州市因同时存在 ULUE 滞后与 EH 滞后问题处于轻度失调衰退阶段。中上游地区 ULUE 与 EH 之间的耦合均处于初级协调至良好协调发展之间,区域间差异较小,整体呈现稳步提升的趋势,且南部市域协调发展水平的提升更为明显。其中,中游地区整体协调发展水平的渐变提升主要是南部处于初级协调发展水平的城市向中级协调发展水平转变

的驱动,至 2018 年,具有良好 EH 水平的湖南与江西两省基本实现中级及以上协调发展水平,而 EH 水平多处于一般或较弱状态的湖北中部市域受 ULUE 滞后影响大多处于初级协调发展水平;此外,中心城市协调发展水平高于周边城市也是中部地区尤其是湖北省域内耦合协调空间格局的特点之一,同时该地区在 ULUE 与 EH 空间格局上也存在相同或相反的分布特点,这在一定程度上说明其在城市土地利用与生态保护之间未能达到良好平衡,中心城市与周边城市之间联系也不够紧密,如何加强地区间经济联系,解决劳动力、资本等外部投入冗余问题以及提升污染净化与环境治理水平以实现进一步的耦合协调发展应是该地区城市未来发展的共同努力方向。而上游地区整体协调发展水平在 ULUE 与 EH 同步提升的双驱动下进一步向良好协调发展迈进,主要体现在成渝地区由初级协调发展向中级协调发展的转变提升,以及云南省基本实现良好协调发展,形成一个小范围耦合协调度高值区,这主要得益于其显著提升的 ULUE 水平与稳定的 EH 状态;此外,贵州与四川两省有少数市域存在单方面的 ULUE 滞后或 EH 滞后问题,资源禀赋和地理位置条件的制约,导致其发展的可持续性较低以及协调性不高,未来发展应探索新的经济发展模式以提高经济社会发展水平,同时整合现有自然资源调整生态系统结构,以缓解或消除阻碍地区协调发展水平提升的潜在影响。



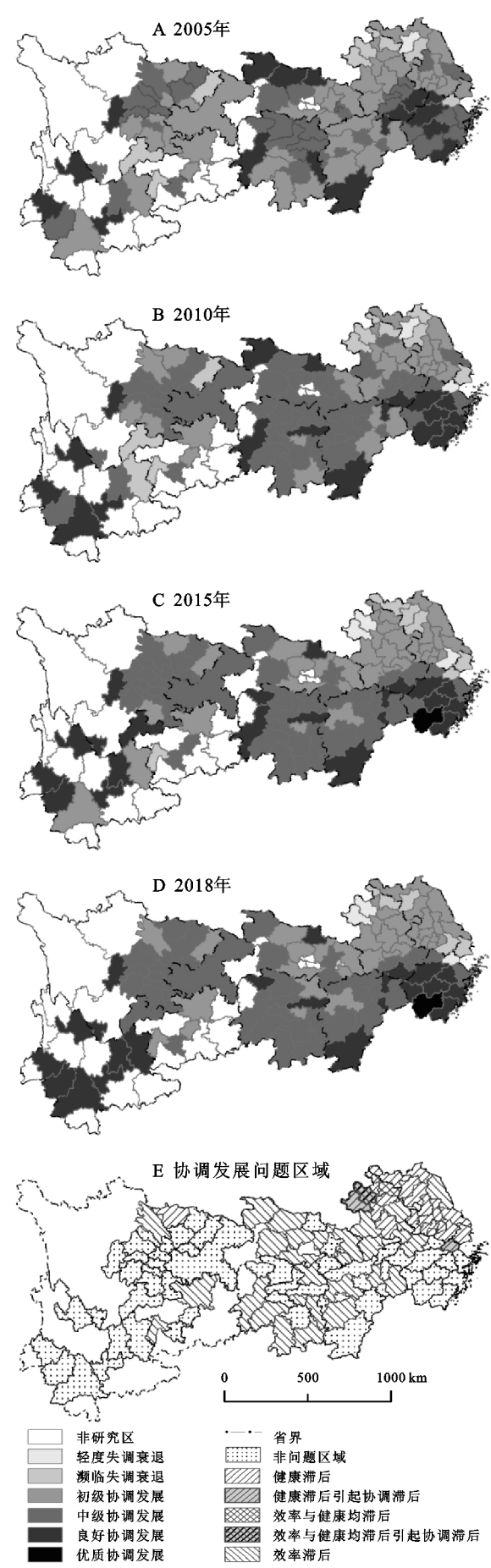


图 6 2005—2018 年长江经济带 ULUE 与 EH 耦合协调度空间格局

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

针对当前文献对城镇化与生态环境耦合体系研究中多采用综合评价指标体系开展研究的情况,本研究从 ULUE 与 EH 角度出发构建耦合机理框架,基于市域尺度研究了耦合巨系统中两个子系统的耦合协调关系。研究尺度差异以及评价指标选择等因素使得本研究中 ULUE 与 EH 的耦合结果与已有研究<sup>[12]</sup>中对应区域相比内部差异较大,但在空间格局上也有相似之处,如中上游地区之间差异较小而下游地区内部之间差异较大,此外,“南高北低”的 EH 空间分异特征也均有体现。尽管如此,区域的协同发展仍需更精细尺度上的研究以便为缩小地区内部发展差异提供更直接的参考依据。此外,研究仍有需要讨论与改进之处:(1) ULUE 测度指标体系仍需完善,一方面是在选取生态效益层面指标时,考虑到以往研究多采用的城市绿地等生态用地的面积或覆盖率本质上应归为投入要素,因此参考相关研究测算的城市绿地当量因子将其非市场价值转化为生态资产,事实上该种非市场价值可从更精细的角度进行测算,这也是后续科学建立 ULUE 评价指标体系研究中重点考量之处;另一方面是在非期望产出层面只考虑了工业“三废”对生态系统的负向影响,缺乏对城市土地利用过程中碳排放的考量。(2) 在 EH 评估中,生态系统活力指标相对单一,后续研究可考虑基于迈阿密模型、桑斯维特模型等经验模型以及 CASA 模型相结合的形式计算生物生产量与植被生产力以更贴合地量化生态系统生产力及其潜力,同时,生态系统弹性系数的设定未能达到完全客观,未来应探索新的方式更科学的量化生态系统弹性。(3) 研究只对 ULUE 与 EH 耦合的时空格局做了定性层面的研究,人类社会经济系统与自然生态系统的相互作用仍有待更深入地分析,整合自然与社会经济指标,深入剖析耦合系统协调发展的驱动机制与制约因素应是未来本研究继续探讨的重点内容。

### 4.2 结论

(1) 2005—2018 年,长江经济带 ULUE 年均值达 0.746,整体呈波动式缓慢上升趋势,空间集聚特征较为显著。年均 ULUE 指数表现为下游>上游>整体>中游,其中上游地区 ULUE 增幅达 37.23%,远高于中下游地区;空间集聚效应主要体现在泛长三角城市群、成渝城市群以及云南省域的 ULUE 高值区,

中游地区存在中心城市 ULUE 水平高于周边城市的空间特征。

(2) 2005—2018 年,长江经济带 EH 得分均值为 0.473,整体呈小幅波动趋势,地理空间上呈现显著的南北分异特征。EH 得分均值表现为中游>上游>整体>下游,除下游地区呈较稳定的“V”型变化外,其余地区均有稳步提升趋势;空间分异主要体现在长江经济带全局较明显的“南高北低”分化格局,且下游地区最为显著,中游地区部分省域存在中心城市 EH 状况弱于周边城市的空间特征。

(3) 2005—2018 年,长江经济带 ULUE 与 EH 的耦合协调均值在 0.611~0.624 区间内小幅增长,空间格局表现为由“相对随机”向“南高北低”的分布转变,至 2018 年,92.62%的市域实现了协调发展,仅 7.47%的市域处于失调状态。研究期间,耦合协调度的提升主要体现中级及以上协调发展水平城市数量的增加;“南高北低”的空间分异特征在下游地区更为明显,中上游地区内部差异则较小;城市土地利用效率与生态系统健康耦合协调问题区域主要存在于长江经济带中下游部分市域,主要原因在于城市土地利用效率或生态系统健康单方面滞后抑制了城市协调发展水平的提升,其中 ULUE 滞后问题区域主要集中在中游城市群外围城市,而 EH 滞后问题区域主要聚集在下游中北部城市。

#### 4.3 建议

(1) 以绿色发展和集约节约为导向,加强供给侧结构改革,提升土地利用优质产出。研究表明,存在 ULUE 滞后问题的市域尤其是中游地区相关城市主要源于土地、劳力等生产要素投入冗余与非期望产出过量,生产结构与污染净化水平仍有较大的优化、提升潜力。对此,在未来的城市土地利用过程中,优先考虑“存量优化”,开发闲置低效土地,推动生产要素的合理配置,降低土地系统的投入冗余率,从内部提高 ULUE 水平;加快产业结构转型升级,提高知识与技术对生产发展的贡献度,完善落后产能纠偏和退出机制与经营主体节能减排机制,着力发展绿色产业,提升城市绿色经济发展水平。

(2) 深入贯彻生态文明建设,基于资源本底与发展现状管理生态系统健康。研究表明,在下游北部城市发展较快的地区所存在的 EH 滞后问题,生产、生活空间对生态空间的挤占是胁迫区域生态的主要原因。因此,城市发展既要合理规划各类用地空间,避免人类活动超过生态承载范围,也要注重城市绿化建

设,可结合地区优势重视森林、湿地和生态廊道等自然或半自然生态用地的保护性建设,通过生态廊道等工程与自然保护区有机结合以增加景观与生物多样性,实现城市发展支撑区域生态;上游地区个别城市所存在 EH 滞后问题主要在于地理位置相对较差,该地区应适度限制建设用地拓展并推行生态型土地整治,同时依托自身资源禀赋与少数民族文化优势,将自然生态与地区文化优势有机结合形成具有独特优势的內生产业,推进城市发展与生态系统的良性互动。

(3) 区域统筹与分区施策并重,推动区域一体化发展。研究结果表明,在较长时期内,长江经济带 ULUE 与 EH 的交互耦合基本实现了协调发展,但地区之间仍存在较明显的差异,部分地区仍面临失调衰退威胁。一方面,响应区域一体化战略,开展协调发展协同机制研究,加强地区之间以及城市群内外部之间的产业关联,建立土地利用与环境治理等经验技术共享机制,推进市域之间技术与创新合作,通过以点带线、以强带弱实现城市间的优势互补,促进区域协同发展;另一方面,各地区之间应从自身协调发展特点出发,对于协调发展水平较高的地区应进一步关注城镇化与生态环境耦合巨系统的协调发展,发挥其示范与带动作用,对于存在协调发展问题或协调发展水平较低的地区,应重点调控对耦合系统整体演化发展影响较大或存在潜在影响的环节,逐步实现城市土地利用效率与生态系统健康协调发展。

#### 参考文献:

- [1] 刘海猛,方创琳,李咏红.城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J].地理学报,2019,74(8):1489-1507.
- [2] 方创琳,周成虎,顾朝林,等.特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径[J].地理学报,2020,71(4):531-550.
- [3] Wu F, Wang X, Ren Y. Urbanization's impacts on ecosystem health dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021,18(3). DOI:10.3390/ijerph18030918.
- [4] Shi J, He Y. Evolution characteristics of urban land use efficiency under environmental constraints in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021,12(2):143-154.
- [5] 苗建军,徐慷.空间视角下产业协同集聚对城市土地利用效率的影响:以长三角城市群为例[J].城市问题,2020(1):12-19.
- [6] 陈丹玲,卢新海,匡兵.长江中游城市群城市土地利用效率的动态演进及空间收敛[J].中国人口·资源与环境,2018,28(12):106-114.

- [7] 姬志恒,张鹏.环境约束下中国城市土地利用效率空间差异及驱动机制:基于285个地级及以上城市的研究[J].中国土地科学,2020,34(8):72-79.
- [8] 刘焱序,彭建,汪安,等.生态系统健康研究进展[J].生态学报,2015,35(18):5920-5930.
- [9] 欧维新,张伦嘉,陶宇,等.基于土地利用变化的长三角生态系统健康时空动态研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(5):84-92.
- [10] 徐烨,杨帆,颜昌宙.基于景观格局分析的雄安城市湿地生态健康评价[J].生态学报,2020,40(20):7132-7142.
- [11] Meng L, Huang J, Dong J. Assessment of rural ecosystem health and type classification in Jiangsu province, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615:1218-1228.
- [12] Xie X, Fang B, Xu H, et al. Study on the coordinated relationship between Urban Land use efficiency and ecosystem health in China[J]. Land Use Policy, 2021, 102.DOI:10.1016/j.landusepol.2020.105235.
- [13] 吴传钧.论地理学的研究核心:人地关系地域系统[J].经济地理,1991,11(3):1-6.
- [14] 肖风劲,欧阳华.生态系统健康及其评价指标和方法[J].自然资源学报,2002,17(2):203-209.
- [15] Costanza R. Toward an Operational Definition of Ecosystem Health [M] // Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington D C: Island Press, 1992.
- [16] Rapport D J, Böhm G, Buckingham D, et al. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead[J]. Ecosystem Health, 1999,5(2):82-90.
- [17] 黄金川,方创琳.城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J].地理研究,2003,22(2):211-220.
- [18] 李菁,胡碧霞,匡兵,等.中国城市土地利用效率测度及其动态演进特征[J].经济地理,2017,37(8):162-167.
- [19] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
- [20] 陈丹玲,卢新海,匡兵.长江中游城市群城市土地利用效率的动态演进及空间收敛[J].中国人口·资源与环境,2018,28(12):106-114.
- [21] 董家华,舒廷飞,谢慧,等.城市建设用地生态服务功能价值计算与应用[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(5):636-640.
- [22] Pan Z, He J, Liu D, et al. Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Science of the Total Environment, 2021,774.DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.144837.
- [23] Peng J, Liu Y, Li T, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: A case study in Lijiang City, China [J]. Ecological Indicators, 2017, 72:399-410.
- [24] Manob D, Arijit D, Paulo P, et al. Exploring the spatio-temporal dynamics of ecosystem health: A study on a rapidly urbanizing metropolitan area of Lower Gangetic Plain, India [J]. Ecological Indicators, 2021,125. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107584.
- [25] 沙宏杰,张东,施顺杰,等.基于耦合模型和遥感技术的江苏中部海岸带生态系统健康评价[J].生态学报,2018,38(19):7102-7112.
- [26] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- [27] 李建新,梁曼,钟业喜.长江经济带经济与环境协调发展的时空格局及问题区域识别[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2584-2596.
- [28] 马艳.长江经济带城镇化与生态环境耦合协调效应测度与交互胁迫关系验证[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):275-286.
- [29] 周侃,伍健雄,樊杰,等.长江经济带环境污染胁迫的驱动因素及空间效应[J].环境科学学报,2021,41(5):1996-2004.
- [30] Chen J, Yang S, Li H, et al. Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks(Jenks) [J]. Isprs-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013,3(4):47-50.