

# 流域生态系统服务价值、生态风险过程及其关联性

## ——以淮河流域安徽段为例

蒋伟峰, 许艳, 李冬花, 毕珊珊, 李倩, 陆林

(安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** [目的] 明确流域生态系统服务价值和生态风险的时空格局及相互关系, 为保证生态系统健康可持续发展, 维护区域生态系统平衡, 促进人地关系协调发展提供科学依据, 为淮河流域综合治理的政策制定提供科学参考。[方法] 基于淮河流域安徽段 2000—2019 年的土地利用数据和社会经济统计数据, 利用动态当量法构建生态系统服务价值(ESV)动态评估模型, 核算研究区各年份 ESV, 并结合空间探索性数据分析, 探讨 ESV 与生态风险(ER)时空演化过程的异质性和关联性。[结果] ①2000—2019 年研究区地类转换频繁, 其中建设用地、农田转入转出最多(1 488, 1 763 km<sup>2</sup>)。② ESV 总量呈波动上升趋势。2000—2019 年 ESV 总量从  $3.13 \times 10^{10}$  元增至  $3.58 \times 10^{10}$  元, 生态系统服务以调节服务为主, 农田和水域对 ESV 总量贡献率达 70% 以上。ESV 高值区主要在六安市以及淮河支干流两侧。③ ER 指数整体较稳定, 研究区 ER 均值波动幅度在 0.01 范围内, 空间分布整体呈现出中部高、西南低的特征, ER 高值区主要在城镇建设用地周围。[结论] 研究区 ESV 总量呈动态上升趋势, ESV 与 ER 具有空间集聚性, 并且二者存在负向空间关联特征。

**关键词:** 生态系统服务价值; 生态风险; 动态当量; 空间关联性; 淮河流域

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2022)03-0120-11

**中图分类号:** X87, X826

**文献参数:** 蒋伟峰, 许艳, 李冬花, 等. 流域生态系统服务价值、生态风险过程及其关联性[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 120-130. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.017; Jiang Weifeng, Xu Yan, Li Donghua, et al. Process and correlation between ecosystem services value and ecological risk in river basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 120-130.

## Process and Correlation Between Ecosystem Services Value and Ecological Risk in River Basin —A Case Study at Huaihe River Basin in Anhui Province

Jiang Weifeng, Xu Yan, Li Donghua, Bi Shanshan, Li Qian, Lu Lin

(School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal pattern and interrelationship between the value of ecosystem services and ecological risks in river basins were analyzed in order to ensure healthy and sustainable development of ecosystems, maintain regional ecosystem balance, and promote the coordinated development of human-land relationships. The results will provide a scientific reference for policy formulation for the comprehensive management of the Huaihe River basin. [Methods] Based on land use data and socio-economic statistical data for the Huaihe River basin in Anhui Province from 2000 to 2019, a dynamic evaluation model of ecosystem service value was established by using the dynamic equivalence method. The ecosystem service value of the study area was calculated for each year. Combined with spatial exploratory data analysis, the heterogeneity and correlation of the spatial and temporal evolution processes of the ecosystem service value (ESV) and ecological risk (ER) were discussed. [Results] ① Conversion of land types in the research area from 2000 to 2019 occurred frequently, with the greatest transfers occurring for construction land and farmland (1 488, 1 763 km<sup>2</sup>). ② ESV total amount showed a fluctuating upward trend. From 2000 to 2019, the total amount of ESV increased from  $3.13 \times 10^{10}$  yuan to  $3.58 \times 10^{10}$  yuan, with ecosystem services dominated by regulation services. Farmland and water bodies contributed 70% or more to the total amount of ESV. ESV high-value areas were mainly in Luotian City and on both sides of the Huaihe River branches and main channels. ③ ER index was relatively stable, and the ER mean value fluctuation range in the study area was within 0.01. The spatial distribution of ER overall presented a characteristic of high in the middle and low in the southwest. ER high-value areas were mainly around urban construction land. [Conclusion] The total amount of ESV in the study area showed a dynamic upward trend, ESV and ER had spatial agglomeration, and there was a negative spatial correlation feature.

收稿日期: 2021-11-01

修回日期: 2021-12-07

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“旅游引导城市群乡土—生态空间演化的过程、格局和机制”(41930644)

第一作者: 蒋伟峰(1997—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 主要从事人文地理与生态系统服务研究。Email: jwf111752@163.com。

通信作者: 陆林(1962—), 男(汉族), 安徽省芜湖市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事旅游管理与旅游地理研究。Email: llin@263.net。

1 763 km<sup>2</sup>, respectively). ② The total amount of ESV exhibited a fluctuating upward trend, from  $3.13 \times 10^{10}$  yuan to  $3.58 \times 10^{10}$  yuan. The ecosystem services were mainly regulatory services. Farmland and water contributed more than 70% to the total ESV. The high value ESV area was located mainly in Liu'an City and on both sides of the Huaihe River tributaries. ③ The ER index was stable overall. The average fluctuation of ER in the study area was within the range of 0.01. The spatial distribution showed the characteristics of high in the central part of the region and low in the southwest. The high value ER area was mainly located around urban construction land. [Conclusion] The total number of ESVs in the study area exhibited a dynamic upward trend. ESV and ER exhibited spatial aggregation in the study area, and there were positive spatial association characteristics.

**Keywords:** ecosystem service value; ecological risk; dynamic equivalent; spatial relevance; Huaihe River basin

生态系统服务是指生态系统的结构、功能和过程为人类社会的生产、消费等活动提供有形或者无形自然产品、环境资源和生态损益的能力<sup>[1-3]</sup>,它是人类生存与发展的基础<sup>[4]</sup>。十九大报告指出,我们必须树立和践行“两山理论”,坚持节约资源、保护环境的基本国策,坚持人与自然和谐共生,建构新的资源观<sup>[5-6]</sup>。流域作为一种复合生态系统,既是重要的生态循环空间,又是社会经济发展的重要单元<sup>[7-8]</sup>,在现阶段生态文明建设中具有重要地位。淮河流域安徽段地处其流域中部,历来地广人众,是农耕文明主要分布区;同时该地水旱灾害频发,区域生态环境的稳定性一直备受人们关注。因此推动流域生态系统服务价值核算与生态风险评估对协调人地关系、贯彻新发展理念、推动淮河流域可持续发展具有重要意义。

生态系统服务价值(ESV)是生态系统服务内容的市场化表现形式。20世纪90年代,国外学者开始了对ESV的探索性研究,学者Costanza等<sup>[9]</sup>最早提出ESV的类型划分、核算原理与方法,2001年联合国千年生态系统评估项目开展,将ESV研究推至新的高度。21世纪初期,国内学者谢高地、欧阳志云等在国外研究成果基础上围绕ESV科学内涵、生态学机制等展开重要论述,此后众多学者从生态系统类型<sup>[10-12]</sup>、核算方法<sup>[13]</sup>等方面进行系列研究。回顾国内外研究发现:ESV研究尺度从大空间尺度到中小空间尺度均有涵盖<sup>[14-15]</sup>;研究内容由单一型生态系统向城镇、农田等复合型生态系统转变<sup>[16-17]</sup>;研究方法上综合GIS与RS技术构建ESV核算模型,并开展可视化分析<sup>[18-19]</sup>;在核算方法上,当量因子法相较功能价值法具有核算过程简明、具有横向可比性等优点,被广泛应用于各类ESV评估分析之中<sup>[20]</sup>。生态风险(ER)是指在一定区域内,由于人类活动或自然变化引起生态系统组成、结构改变而导致系统功能损失的可能性<sup>[21]</sup>。现阶段国内外针对ER的研究主要包括两方面,首先是关于生态风险的理论与方法综

述,其次是基于多时空尺度评估城市、矿区等特定生态系统的生态风险。生态风险评估是指对因自然变化、人类活动等外界胁迫因素造成的生态损失进行评估与核算,而区域生态风险等级转化过程,最终体现在ESV总量随时间的波动上,二者呈相互关联性<sup>[22]</sup>。

生态系统服务与生态风险作为评价区域生态环境质量的重要指标<sup>[23]</sup>,与生态安全评估联系密切,通过核算不同地类、不同服务类型的生态系统服务总量,能够在生态环境质量研究与人类福祉发展之间建立紧密联系,这在区域ER等级评估中有突出实践价值<sup>[24]</sup>。目前国内外关于ESV与ER的研究成果正逐渐丰富,但在以下方面尚需进一步拓展:①ESV核算精度有待提升,已有研究多基于自然因素或社会经济因素的单维度构建或修正当量因子,缺乏兼顾二者的多维度当量因子修正探索。由于生态系统存在空间异质性和复杂性,直接引用前人当量因子表核算区域ESV,往往只能得到静态估计值<sup>[25]</sup>,没有考虑到由于社会发展或资源禀赋差异而导致的市场价格变动因素<sup>[26]</sup>,因此必须结合区域特征修正当量因子表,核算研究区ESV动态估计值。②已有研究较大程度上忽视了ESV空间关联关系的分析。近年来,ESV与ER的关系研究逐步由相对独立走向融合,研究对象涉及高原、山地、流域等不同地貌类型、地貌单元。与其他研究区相比,流域具有明显的独立性和脆弱性,目前针对其ESV与ER的关联研究相对偏少,而分析二者对行政单元尺度的响应研究则更是较为少见。

淮河流域安徽段地跨南北,是整个流域重要生态屏障区、生物多样性示范区,同时也是生态环境较脆弱地区<sup>[27]</sup>。2020年淮河第1号洪水来袭,淮河流域安徽段王家坝开闸泄洪,阜阳市蒙洼等蓄洪区及时削减洪峰、存蓄洪水,有效降低了下游水患风险。2018年10月,国务院发布《关于淮河生态经济带发展规划的批复》,提出将其构建为中国第四增长极的战略目

标。目前淮河流域处于向高质量发展转型阶段,淮河流域安徽段内生态系统的健康稳定,对流域经济社会发展具有重要意义。鉴于上述因素,本文将淮河流域安徽段作为研究对象,基于动态当量法核算 ESV 与 ER,探究二者在数量变化、时空格局演变等方面的关联性。以期促进动态当量法在生态系统服务研究中的应用,为流域生态文明建设、生态安全格局构建和实现高质量发展提供科学参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

淮河流域安徽段位于(114°54′—119°37′E, 30°57′—34°38′N)安徽省北部,范围主要包括宿州、淮北、蚌埠、亳州、阜阳、淮南、六安、滁州 8 市和合肥市长丰县(图 1),流域面积约  $6.70 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其干流长度占淮河总长的 41.8%。淮河流域安徽段气候属南北气候过渡带,冷热、旱涝转换迅速,极端气候事件频繁<sup>[28-29]</sup>,安徽段一直主要承担着流域调蓄功能,目前流域内 23 处干流行蓄洪区,21 处在安徽境内。淮河流域安徽段地形以平原、山地丘陵为主,地势由南向北放缓;西南部为大别山区,动植物资源丰富,是区域重要生态安全屏障和生物多样性典型地区<sup>[30]</sup>。根据《安徽省统计年鉴 2020》,淮河流域安徽段 2019 年流域总人口达  $3.81 \times 10^7$  人,GDP 约为  $1.60 \times 10^{12}$  元。同时该地农业生产条件优越,是全国重要粮食主产区。

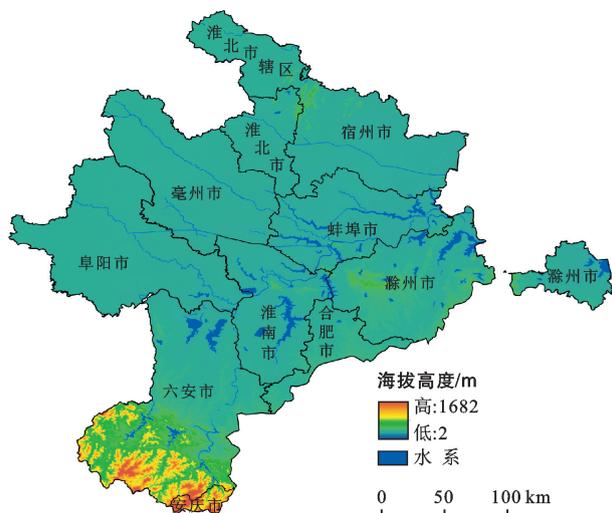


图 1 淮河流域安徽段地理概况

### 1.2 数据来源

本文研究数据主要有土地利用数据、海拔数据、植被净初级生产力(NPP)数据、经济社会统计数据、基础地理数据。淮河流域安徽段 2000—2019 年 5 期

土地利用数据均来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。根据研究区实际情况与研究需求,借助 ArcGIS10.5 进行按掩膜提取、重分类等,最终将研究区土地类型划分为林地、草地、水域、农田、建设用地和未利用地 6 类;DEM 数据来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)中 SRTM 90 m 空间分辨率的数字高程;NPP 数据来自于中科院全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/>)和 Google Earth Engine 平台;计算 2000—2019 年 ESV 修正系数所需的经济社会统计数据来自于国家统计局官网(<http://www.stats.gov.cn/>)和安徽省、市(县)统计年鉴、统计公报;行政区划、水系、流域范围等基础地理数据来自于国家基础地理信息中心(<https://www.webmap.cn/>)提供的 1:100 万全国基础地理数据库。

## 2 研究方法

为更好实现研究区 ESV 与 ER 的空间可视化,本文选择将网格作为基本研究单元。景观样本面积达到研究区景观斑块面积的 2~5 倍时<sup>[31]</sup>,网格单元内的相关信息才能够被有效表征。综合考虑研究区的生态空间特性和核算精度与强度,发现 5 km 是研究区格网选择的最佳尺度,因此对研究区进行等间距采样、创建渔网,将其划分为 5 km×5 km 的网格共计 2 871 个。

### 2.1 生态系统服务价值核算

根据学者 Costanza 和联合国千年生态系统评估项目的研究成果可知,生态系统服务类型可划分为供给、调节、支持、文化 4 大类型。目前,谢高地等人提出的当量因子表是核算研究区 ESV 的主要工具,但由于该当量因子表是从全国尺度考虑生态系统的平均水平,难以体现生态系统的空间异质性、资源稀缺性以及社会经济变动对 ESV 的影响。基于此,本文结合已有研究成果<sup>[32]</sup>,根据研究区实地情况,通过构建 ESV 动态当量表来修正核算结果。

2.1.1 标准单位生态系统生态服务价值当量因子确定 根据定义可知,1 标准单位生态系统生态服务价值当量因子是指 1  $\text{hm}^2$  面积的全国平均产量的农田,其每年粮食生产净利润的 1/7<sup>[33]</sup>。计算公式如下:

$$E = \frac{M}{S} \times \frac{1}{7}; \quad V_c = E \times V_a \quad (1)$$

式中: $E$  为标准单位 ESV 的当量因子(元/ $\text{hm}^2$ ); $M$  为研究区粮食总产值; $S$  为研究区面积; $V_a$  为生态系统服务当量因子; $V_c$  为生态系统服务价值系数

(元/hm<sup>2</sup>)。为减少因物价差异带来的影响,本文统计安徽省 1999—2019 年粮食价格,基于平均价格算出各年份粮食总产值。根据以上公式,借鉴谢高地等当量因子表,分别计算出研究区林地、草地、水域、农田、未利用地的生态系统服务价值系数,其中未利用地对应荒漠生态系统价值当量,建设用地的价值当量定义为 0。

### 2.1.2 构建生态服务价值动态当量表

(1) 空间异质性系数修正。由地理学第二定律可知,空间的隔离会造成地理事物之间的差异,即异质性,包括空间局域异质性和空间分层异质性<sup>[34]</sup>。生态系统服务价值的大小决定于生态系统的强弱,而生态系统的变化往往与其所在区域的生物量有着密切联系<sup>[35]</sup>。一般来说,生态系统的强弱与生物量的变化呈正相关关系,因此选择植被净初级生产力指数(NPP)反映生物量。NPP 是指绿色植物在单位时空范围内积累的有机物数量<sup>[36]</sup>。本文 NPP 数据利用全国气象数据、土壤质地数据、土地覆被数据以及植被指数数据,输入 Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模型,得到最终 NPP 数据。同时由于农田在研究区域中占据绝对优势,因此本文选择 NPP 指数和平均粮食单产量两个指标建立空间异质性修正系数。计算公式如下:

$$N = \frac{NPP'}{NPP''} + \frac{yield'}{yield''} \quad (2)$$

式中: $N$  表示空间异质性系数; $NPP'$ ,  $NPP''$  分别表示研究区、全国植被净初级生产力[kg/(hm<sup>2</sup>·a)];  $yield'$ ,  $yield''$  分别表示研究区、全国单位面积粮食产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

(2) 社会发展差异性系数修正。人们对 ESV 的认知程度随经济社会发展而不断深入,与此相对应,人们关于 ESV 的支付意愿也会提高,也更具实际支付能力<sup>[37]</sup>。因此本文选择支付能力与支付意愿指标构建社会发展差异性修正系数,利用 GDP 表征实际支付能力,利用皮尔生长曲线模型表征支付意愿<sup>[29]</sup>。计算公式如下:

$$Q = Z \times W \quad (3)$$

$$Z = \frac{GDP'}{GDP''}, \quad W = \frac{level'}{level''} \quad (4)$$

$$level = \frac{1}{1 + e^{-\frac{An}{\lambda n}}} \times \frac{l}{L}, \quad An = X_1 Y_1 + X_2 Y_2 \quad (5)$$

式中: $Q$  表示社会发展差异性系数; $Z$  表示人们的实际支付能力; $W$  表示人们的支付意愿; $GDP'$ ,  $GDP''$  分别表示研究区、全国人均 GDP;  $level'$ ,  $level''$  分别表示研究区、全国的社会发展水平; $An$  表示恩格尔

系数(%),  $X_1$ ,  $X_2$  分别表示城市、农村恩格尔系数,  $Y_1$ ,  $Y_2$  分别表示城市、农村人口占总人口比重; $L$  和  $l$  分别表示全国和研究区城市化水平。

(3) 资源稀缺性系数修正。资源稀缺是相对于区域资源的供给与需求而言,区域的资源需求随着人口的增多而上升,资源的稀缺度则会上升,反之亦然<sup>[26]</sup>。因此基于人口密度指标建立资源稀缺性修正系数。计算公式如下:

$$K = \frac{\ln h}{\ln H} \quad (6)$$

式中: $K$  表示研究区资源稀缺性系数; $h$ ,  $H$  分别表示研究区和全国人口密度(人/km<sup>2</sup>)。

综合上述计算,可得到淮河流域安徽段生态系统服务价值动态当量结果(表 1)。那么最终的 ESV 计算公式如下:

$$ESV = \sum (VC \times N \times Q \times K \times S) \quad (7)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值(元); VC 表示生态系统服务价值系数(元/hm<sup>2</sup>);  $N$  为空间异质性系数; $Q$  为社会发展差异性系数; $K$  为资源稀缺性系数; $S$  表示各类型土地利用面积(hm<sup>2</sup>)。

表 1 淮河流域安徽段生态系统服务价值动态当量

修正系数	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
空间异质性系数	0.598 7	0.592 3	0.638 1	0.593 7	0.577 9
社会发展差异性系数	0.415 3	0.437 0	0.366 6	0.407 8	0.513 9
资源稀缺性系数	0.981 8	0.984 0	0.990 5	0.958 3	0.956 8

## 2.2 生态风险指数核算

区域生态风险指数高低取决于研究区内各土地类型的空间组合状况及其所占比例<sup>[38]</sup>。鉴于此,参考相关研究<sup>[39]</sup>,核算格网单元内各地类面积比例以及相应风险权重系数,定量描述评价单元生态风险。计算公式如下:

$$ER_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{D_{ij}}{A} \times P_j \quad (8)$$

式中: $ER_{ij}$  表示格网单元  $i$  的第  $j$  类土地利用类型的生态风险指数; $D_{ij}$  表示格网单元  $i$  中第  $j$  类土地利用类型的面积; $A$  表示格网单元的面积; $P_j$  表示第  $j$  类土地利用类型的生态风险参数。结合淮河流域安徽段土地利用分类特征以及研究需要,借鉴专家学者的研究成果<sup>[10-11,30]</sup>,对研究区每一地类都赋予相应权重,其中林地、草地、水域、农田、建设用地、未利用地依次分别赋值 0.12, 0.16, 0.53, 0.32, 0.82, 0.85。

## 2.3 探索性空间数据分析

探索性空间数据分析是同一类型空间数据分析

方法的集合,其中最核心的是利用空间自相关模型测度研究对象的空间异质性或趋同性<sup>[40]</sup>。本文通过全局 Moran's  $I$  指数、Moran 散点图、空间关联局部指标(LISA)测度淮河流域安徽段 ESV 与 ER 空间特征。相关计算公式如下:

$$I_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \left( \frac{\lambda_i - \bar{\lambda}}{\varphi_i} \right) \left( \frac{\lambda_j - \bar{\lambda}}{\varphi_j} \right)}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (9)$$

$$I_2 = \beta_i \sum_j \omega_{ij} \beta_j, \quad \beta_i = \frac{n(\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{\sum_i (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}, \quad \beta_j = \lambda_j - \bar{\lambda} \quad (10)$$

式中: $I_1$  表示全局 Moran's  $I$  指数; $n$  表示研究区格网单元总数量; $\lambda_i, \lambda_j$  分别表示某一单元格网内 ESV, ER 的数值大小; $\varphi_i, \varphi_j$  表示方差; $\omega_{ij}$  表示空间权重矩阵; $I_2$  表示局部 Moran's  $I$  指数; $\beta_i, \beta_j$  分别表示单元格网内 ESV, ER 数值的标准化。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化情况

根据土地利用分类结果可知,研究期内各土地利用类型情况均已发生改变。从整体上看,2000—2019 年研究区土地利用类型以农田为主,约占研究区面积 70%,其次是建设用地和森林,未利用地占比最小。从各地类面积增减幅度来看,建设用地、水域面积呈增长趋势;森林、草地、农田呈减小趋势;未利用地面积增幅较小,总体相对稳定。其中建设用地面积增长最为迅速,其面积净增加 1 488 km<sup>2</sup>,增长率为 18.04%;水域增长面积次之,为 129 km<sup>2</sup>;未利用地面积增幅最小,约为 7 km<sup>2</sup>。与此相对应的是,农田面积减少最多,面积达 1 763 km<sup>2</sup>,其次是森林和草地,面积减少约 166 km<sup>2</sup> 及 240 km<sup>2</sup>。

从各地类面积转移桑基图(图 2)可知,自 2000—2019 年,研究区各地类转移总面积达 21 453 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 31.09%。在各地类面积转移情况中,农田和建设用地转移面积占据主导地位,其转移总面积为 16 856 km<sup>2</sup>,占总转移面积的 78.57%,而农田作为主要转出地类,其转出面积为 8 713 km<sup>2</sup>,主要转为建设用地、水域和林地。同时农田地类也作为主要转入类型,其面积主要来源于建设用地和水域。除此之外,森林主要转为草地和农田,转出面积为 1 652 km<sup>2</sup>,占总转移面积的 7.7%;水域主要由农田和建设用地转入,转入面积为 1 332 km<sup>2</sup>,占总转移面积的 6.2%;草地则主要转变为森林和农田,变化面积为 1 357 km<sup>2</sup>,占总转移面积的 6%;未利用地类转出为农田和水域,转出面积分别为 6 km<sup>2</sup> 及 1 km<sup>2</sup>。

综合研究区各地类面积转移情况可知,与建设用地和农田地类相比,其余地类转移面积均相对较小。

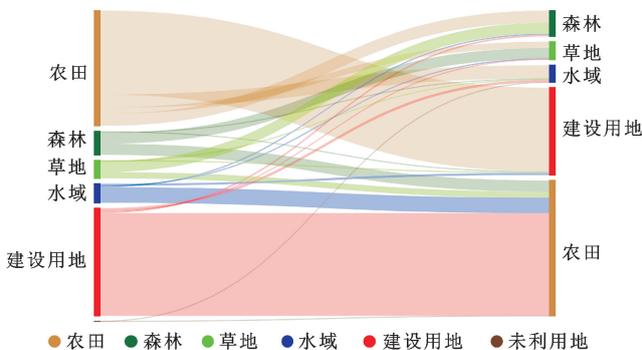


图 2 土地利用面积(km<sup>2</sup>)转移桑基图

### 3.2 生态系统服务价值时空特征分析

根据公式(7)可得到研究区 ESV 核算结果及其结构变化情况(图 3,表 2)。2000—2019 年淮河流域安徽段 ESV 总量由  $3.13 \times 10^{10}$  元增长至  $3.58 \times 10^{10}$  元,总量发展呈上升趋势,增长率为 14.3%,其中 2015—2019 年增幅最大;从各景观类型 ESV 来看,其由高到低依次为:农田>森林>水域>草地>未利用地>建设用地。农田、森林、水域地类的生态系统服务价值是构成研究区 ESV 总量的主体,三者合占总量的 94% 以上,其中农田地类所作贡献已占绝对优势,约 56% 以上。2000—2010 年农田面积虽呈增加趋势,但由于 2010 年当量因子下降,农田 ESV 减少约  $1.81 \times 10^9$  元。除建设用地和未利用地外,其他地类 ESV 发展以 2005 年为节点,2000—2005 年各地类 ESV 发展呈上升趋势,2005—2019 年发展则呈倒“U”型曲线。2000—2019 年,水域、森林、草地 ESV 分别增加  $1.15 \times 10^9$ ,  $8.67 \times 10^8$ ,  $2.47 \times 10^8$  元。可见水域在研究区生态系统调节方面发挥着重要作用。未利用地 ESV 增幅较小,约为  $5.00 \times 10^5$  元;从各服务类型 ESV 来看,其由高到低依次为:调节服务>支持服务>供给服务>文化服务。在研究期内调节服务、文化服务逐步增加,供给服务、支持服务呈减小趋势,这说明研究区生态系统在水文调节、废物处理、土壤保持、气候调节、生物多样性这 5 方面起着重要作用,在将来仍是研究区生态系统的重要功能以及重点保护对象,同时也应关注供给服务和支持服务 ESV 的变化,保证研究区生态系统稳定。

本文基于 ArcGIS 软件核算格网单元 ESV,并采用格网中心点赋值法进行 Kriging 插值,再结合研究区实际,将研究区的格网单元 ESV 划分为低 [368 000, 9 402 000)、较低 [9 402 000, 18 435 000)、中 [18 435 000, 27 469 000)、较高 [27 469 000, 36 502 000)、

高[36 502 000,  $\infty$ )5 个等级(图 4)。由图 4 可知,淮河流域安徽段 ESV 呈现出南部高、西北低分布格局。ESV 高价值区主要集中在研究区东南部的六安、淮南、蚌埠、滁州市,其中六安市金寨、霍山县以及市辖区西南部为集中连片区域,其余高价值区则主要分散于淮河支干流两侧,整体较为分散。在空间格局上,高价值区多位于山地丘陵地带、植被覆盖率高或水域面积宽广的地区,此类区域生态系统等级高,其生物

产量也高于其他地区,相应地可提供更多生态系统服务;较高、中等 ESV 价值区依次分布于高价值区外围,空间分布相对分散;较低、低等 ESV 价值区主要集中在皖北阜阳、亳州、宿州、淮北市部分地区,以及东南部合肥市周边区域。此类区域人口密度高,自然植被分布较少且分散,区域生态系统受农业生产、城市扩张等人为因素干扰较大,因此生态系统等级相对较低,其 ESV 也是如此。

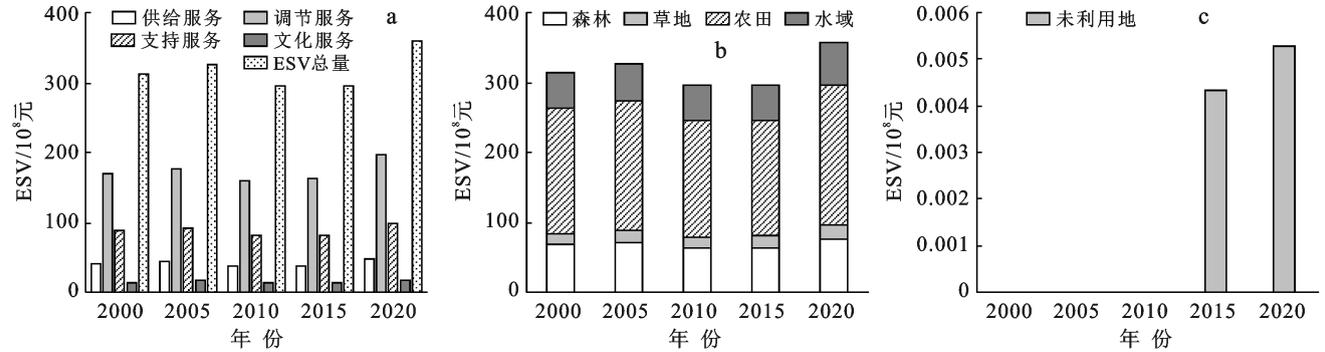


图 3 2000—2019 年研究区 ESV 核算结果构成情况

表 2 2000—2019 年研究区 ESV 核算结果及结构变化情况/ $10^8$  元

生态系统 服务价值 ESV	供给服务		调节服务				支持服务		文化服务	
	食物生产	原料生产	气体调节	气候调节	水文调节	废物处理	土壤保持	生物多样性	美学景观	
2000 年	ESV	24.59	16.89	29.36	36.22	50.41	54.04	46.51	40.38	15.05
	比例/%	7.84	5.39	9.37	11.56	16.08	17.24	14.84	12.88	4.80
2005 年	ESV	25.54	17.56	30.53	37.66	52.44	56.18	48.34	41.99	15.66
	比例/%	7.84	5.39	9.37	11.56	16.09	17.24	14.83	12.88	4.80
2010 年	ESV	23.06	15.89	27.62	34.07	47.65	50.93	43.69	38.01	14.23
	比例/%	7.81	5.38	9.36	11.54	16.15	17.26	14.80	12.88	4.82
2015 年	ESV	23.01	15.90	27.63	34.11	48.16	51.27	43.65	38.09	14.36
	比例/%	7.77	5.37	9.33	11.52	16.26	17.31	14.74	12.86	4.85
2019 年	ESV	27.69	19.06	33.14	41.03	58.94	62.51	52.42	45.89	17.48
	比例/%	7.73	5.32	9.25	11.46	16.46	17.45	14.64	12.81	4.88

### 3.3 生态风险时空特征分析

根据公式(8),在 ArcGIS 软件基础上核算格网单元 ER 数值,在采用中心点赋值法、Kriging 插值后得到 ER 空间分布结果,然后参照相关研究成果<sup>[41]</sup>,将 ER 数值共划分为低[0.05,0.2)、较低[0.2,0.3)、中[0.3,0.37)、较高[0.37,0.41)、高[0.41,  $\infty$ )5 类等级。根据淮河流域安徽段 ER 核算结果及其结构变化情况(图 5,图 6)可知,研究区 5 期 ER 数值均值为 0.358 7,0.353 2,0.349 4,0.347 4,0.346 6,生态风险指数略有波动,说明区域整体生态安全状况较为稳定,生态治理与流域管控措施的成效已开始逐渐显现。其中低、较低风险区面积增大,其像元数由 17.61%增长至 20.79%;中等风险区面积持续减小,其像元数由研究基期的 18.06%降至研究末期的

14.84%,其面积主要转入较低风险区和高、较高风险区;高、较高风险区面积整体略有增长,其像元数比例较研究基期提高约 4.01%。结合研究区生态风险权重系数,出现此现象原因如下:①城镇化进程不断推进,建设用地比例持续提升,原有地类性质被改变;②耕地作为研究区主导地类,耕地面积约占 70%,耕地保护政策推行保证了基本农田面积稳定;③水域面积扩大,包括淮河流域行蓄洪区、引江济淮等工程的建设。

由生态风险分区(图 6)可知,研究区 ER 空间分布非均衡特征明显,低风险区集中在研究区西南部六安市境内。该地区处大别山区范围,城镇化率较低<sup>[11]</sup>,自然环境优越,生态风险较小,其余低风险区域分散于滁州市西部和东北部地区。较低风险区主要分布于低风险区外围以及宿州淮北两市交界地区;

高风险区主要集中在城镇建设区范围,该区域人类活动强度高于其他地区,其生态脆弱性程度亦高于其他

区域,地表覆盖类型以不透水面为主;中等、较高风险区则依次分布于高风险区外围。

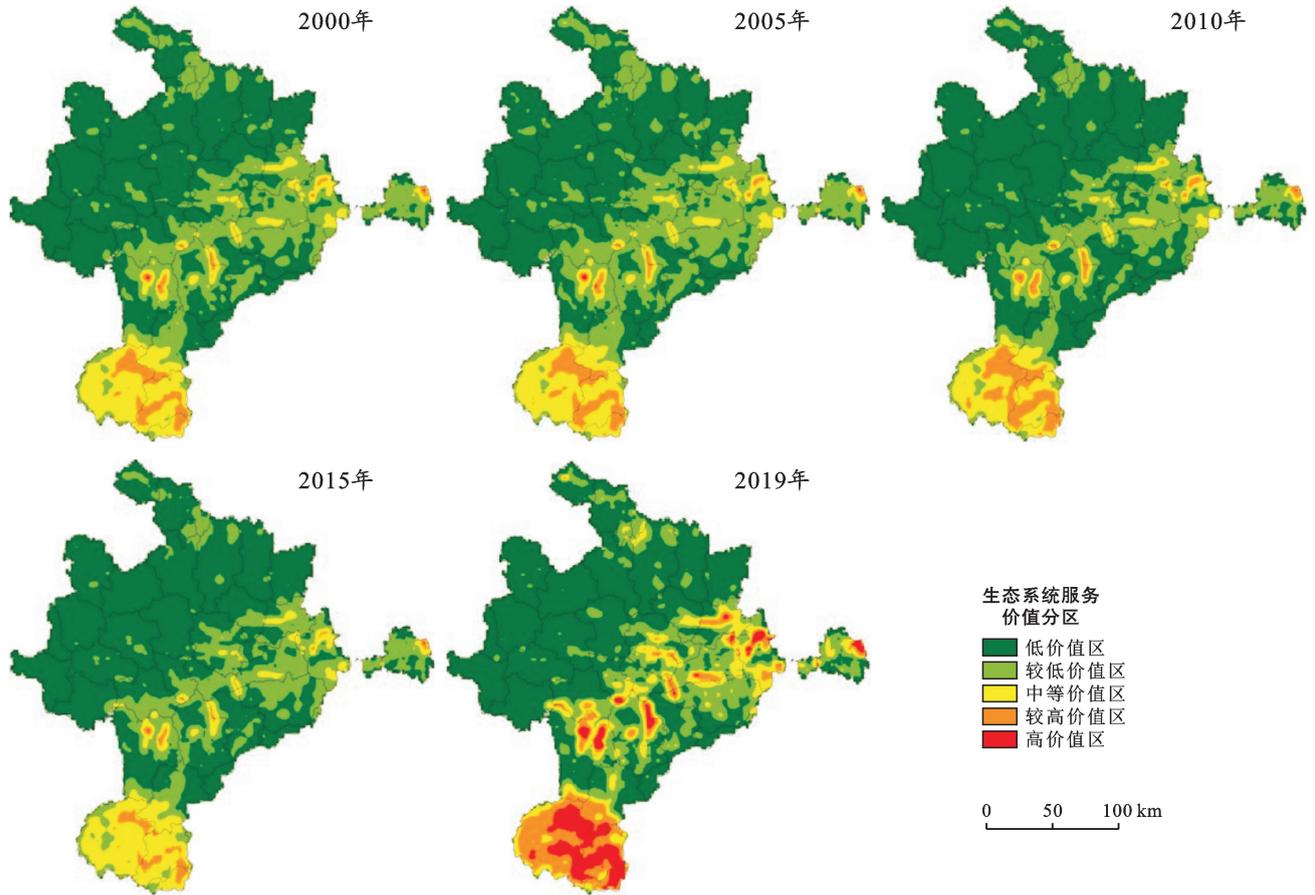


图 4 淮河流域安徽段生态系统服务价值分区特征

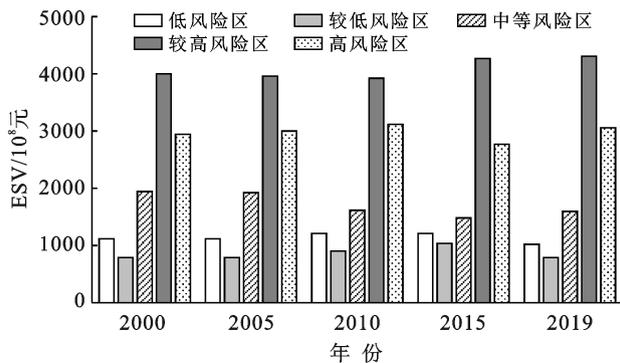


图 5 淮河流域安徽段各等级生态风险面积像元数

### 3.4 生态系统服务价值与生态风险关联性分析

结合地理学第一定律可知,任何地理空间事物都具有相互关联性,且空间距离相近的事物其相关性更强<sup>[42]</sup>。本文为探究格网尺度下淮河流域安徽段 ESV 与 ER 的空间相关性,结合现有研究,从指标相关性、全局自相关、双变量空间自相关方面考虑,分析其空间关联性。

3.4.1 指标相关性 本文利用 SPSS 软件对研究区 ESV 与 ER 数值进行 K-S 正态性检验,以探讨指标间

相关性程度。研究发现二者均不服从正态分布,故采用 Spearman 相关分析进行测度,最终得到淮河流域安徽段 2000—2019 年 ESV 和 ER 的相关性系数。计算结果依次为:  $-0.107$ ,  $-0.111$ ,  $-0.110$ ,  $-0.125$ ,  $-0.109$ , 结果均为负值,说明二者呈显著负相关关系,即当研究区生态系统服务价值总量增加时,区域生态风险趋向减小。

3.4.2 双变量空间自相关 利用双变量 Moran's  $I$  模型,分析淮河流域安徽段 2871 个格网单元的 ESV 与 ER 的空间关联性特征。结果(图 7)表明,2000—2019 年 Moran's  $I$  指数依次为  $-0.311$ ,  $-0.312$ ,  $-0.307$ ,  $-0.296$ ,  $-0.294$ , 这说明研究区 ESV 与 ER 存在着负向空间关联性。

由局部空间自相关 LISA 图(图 8)可知,研究区 ESV 与 ER 的空间关联性显著区域主要集中于西南部六安市境内,其余显著区则分布于各市县建成区附近以及淮河水系周边,空间分布相对分散,其空间关联模式具体分为高价值—高风险(H-H)、低价值—高风险(L-H)、高价值—低风险(H-L)、低价值—低风险(L-L)、不显著(N)5 类。

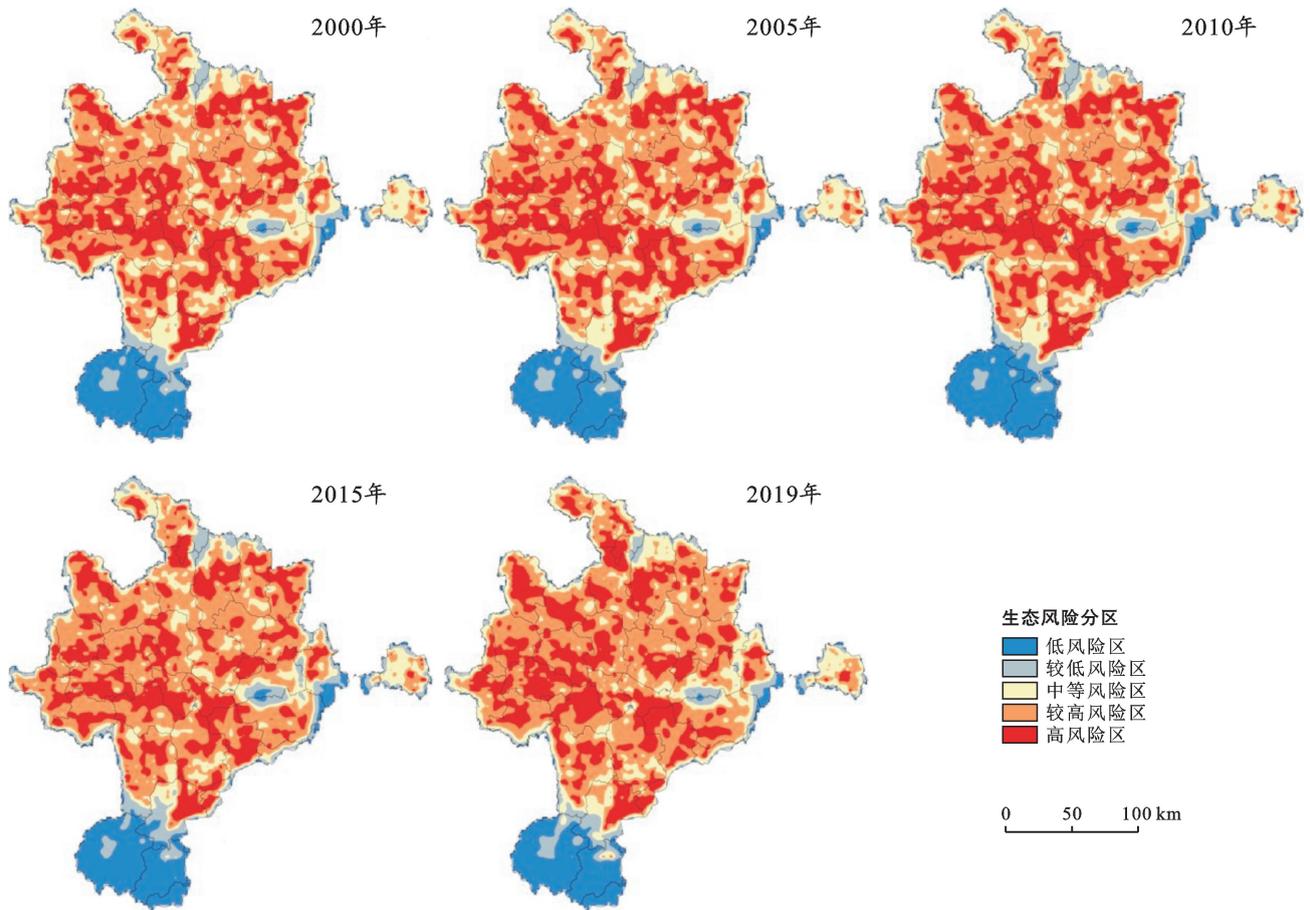


图 6 淮河流域安徽段生态风险分区

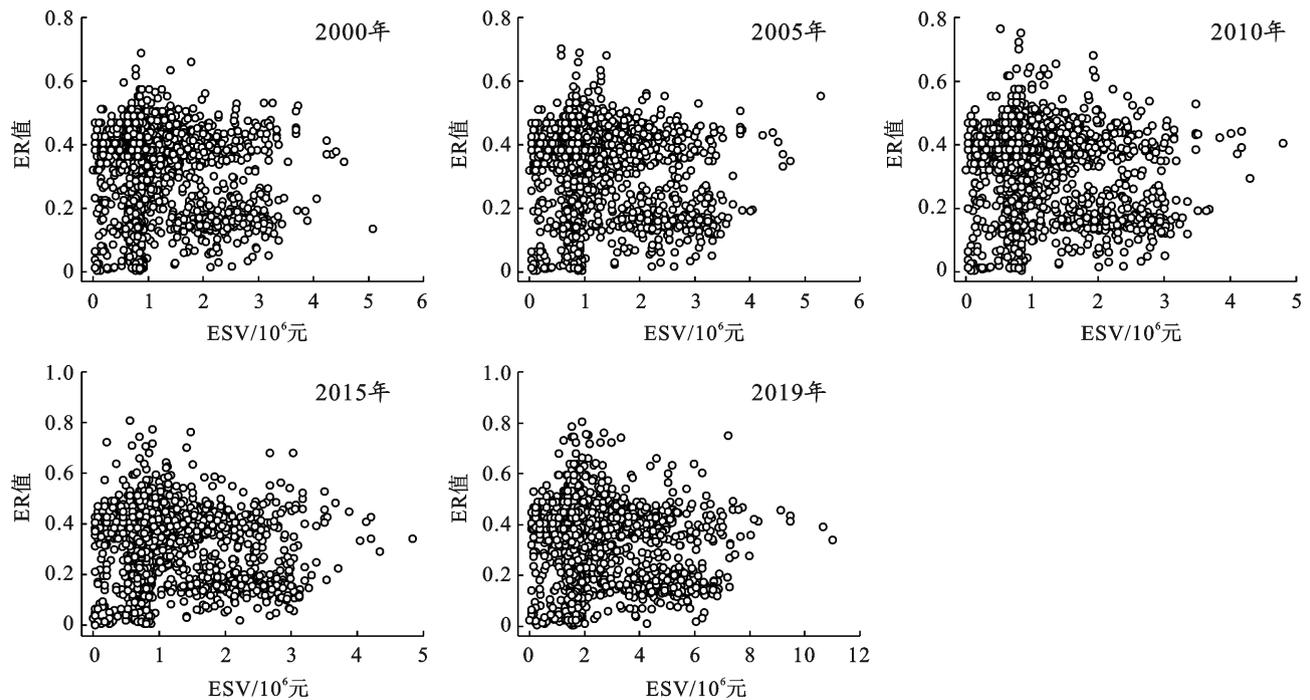


图 7 2000—2019 年淮河流域安徽段 ESV 与 ER 双变量空间自相关结果

高价值—高风险(H-H)区是指研究区中 ESV 高、ER 指数高的格网区域。主要分布在研究区中部

和西部,分布比较零散,景观类型以水体、林草地为主。H-H 区水域提供的 ESV 高于其他土地类型,其

水域面积自 2005 年以后呈增加态势,这主要与研究区行蓄洪区建设、江淮分水岭易旱区综合治理开发规划、淮河流域综合治理等有关;同时林地与草地则存在面积减小与地类转换的风险;低价值—高风险(L-H)区是指研究区中 ESV 低、ER 高的区域,主要集中于研究区中部和西北部。建设用地、农田为 L-H 区主要地类,二者提供的 ESV 总量较低,同时由于流域综合治理以及人造自然景观的增加,部分农田地类存在向林草地转换的可能,因此生态风险较高;高价值—低风险(H-L)区是指研究区中 ESV 高、ER 低的区域,主要位于研究区西南部的六安市境内,该地区处于大别山区,地形多样,生物资源丰富,研究区南岸

支流多发源于此;同时该地区人口密度相对较低,自然环境受人为活动影响较小,因此该区域生态系统服务价值总量大而生态风险较小;低价值—低风险(L-L)区主要分布于研究区东南部狭长区域以及西南部、北部部分地区,土地利用类型以草地、林地为主。林草地相较于其他地类,其提供的 ESV 相对较低(仅高于未利用地),同时该类地区处于山地丘陵地带或自然保护区,地类转换概率较小,因此生态风险为低值;不显著(N)区是指格网单元中 ESV 与 ER 二者空间集聚关系不显著的区域,其占研究期内流域总面积的 59%~65%。该区域地类主要为农田,ESV 总量 ER 等级分布均较均衡,不存在明显集聚中心。

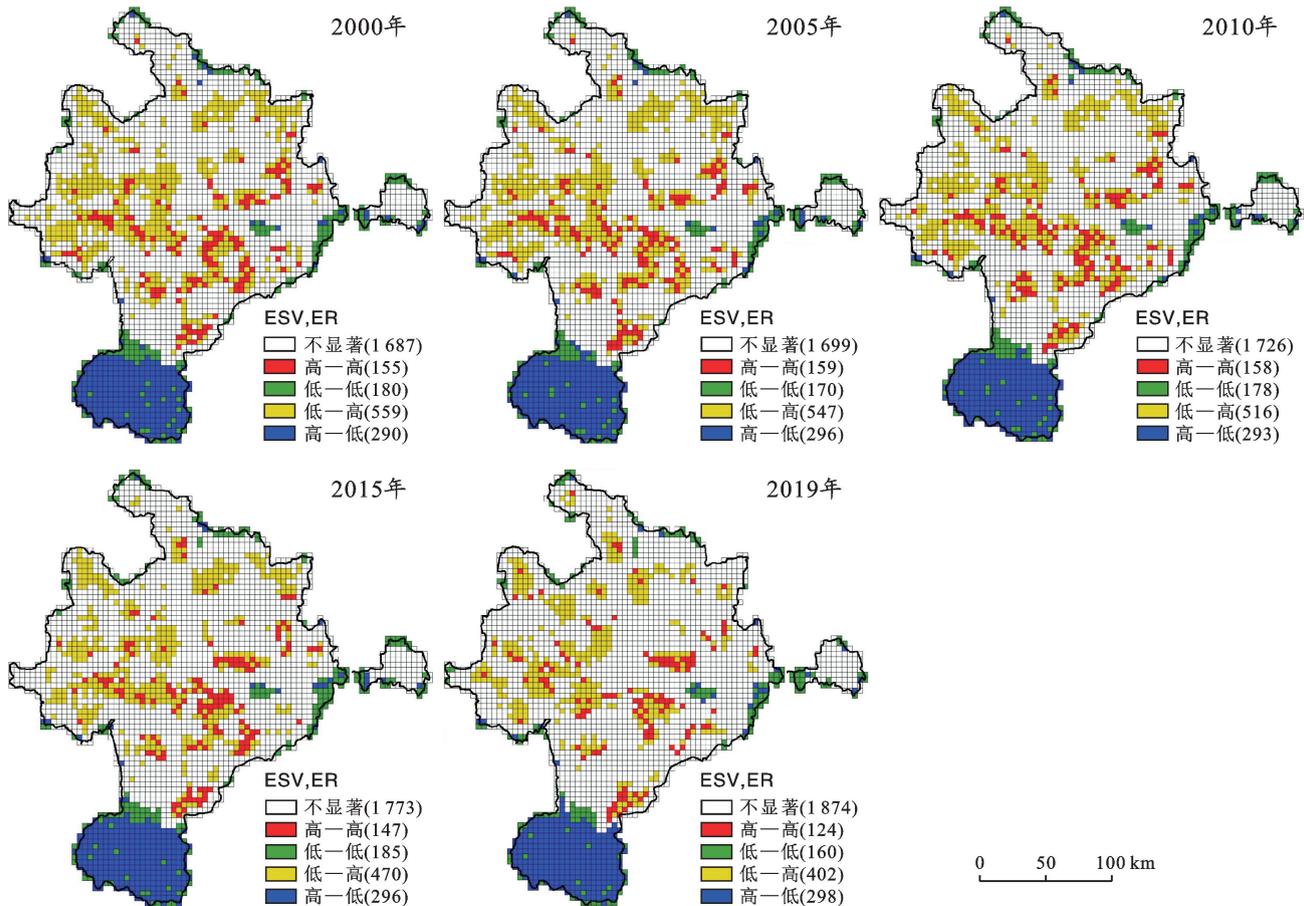


图 8 2000—2019 年淮河流域安徽段局部空间 LISA 自相关

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

淮河流域所处南北过渡地带,地势东西高中间低,作为中国 9 大流域之一,其对区域自然环境稳定和社会经济发展的重要性不言而喻。其中,安徽段所处流域中部,自然资源丰富,农业生产潜力大,一直承担着整个流域的蓄洪防涝任务,对流域综合治理、生态屏障建设有着重要意义。但是,回顾以往流域地域

系统科学研究,发现淮河流域特别是淮河流域安徽段的研究并没有得到学界足够的关注。因此本文以淮河流域安徽段为研究对象,立足于分析研究区 ESV 与 ER 的时空格局特征及其空间关联性,一定程度上是对淮河流域科学研究价值拓展的重要体现。

在基于动态当量法核算 ESV 时,修正指标的选取至关重要,这直接影响最终核算结果<sup>[42]</sup>。潘洪义等<sup>[43]</sup>、左玲丽等<sup>[37]</sup>、胡喜生等<sup>[26]</sup>则引入人均 GDP、恩格尔系数、城市化水平等统计类指标来构建动态当量

表,以达到提高研究区 ESV 核算精度的目的;潘洪义等<sup>[43]</sup>、雷军成<sup>[44]</sup>、姜栋栋等<sup>[45]</sup>根据案例的特性引入土壤调节因子、植被覆盖度、植被净生产力等观测类数据来修正当量因子表;淮河流域安徽段作为中国粮食主要产区,农业生态系统占据其较大比重,同时皖北地区人口众多,对资源的供需造成一定影响,因此本研究选取空间异质性、社会发展阶段差异性、资源稀缺性系数来修正谢高地等提出的当量因子表,进而探讨研究区 ESV 的时空变化关系,这在一定程度上是对已有 ESV 研究的丰富拓展。由于淮河流域安徽段所处南北过渡地带,自然气候环境与经济社会环境差异明显,影响最终 ESV 的因素有很多,因此在后续研究中可构建更科学合理、贴近区域实际特征的 ESV 评估模型。同时本研究是基于动态当量法评估淮河流域安徽段 ESV 的个案研究,其所构建的修正指标体系在其他流域是否具有普适性有待以后进一步验证。

本文以淮河流域安徽段为研究对象,探究 ESV 与 ER 的时空过程与空间关联性。首先本研究的生态系统服务价值与生态风险指数均是基于土地利用产品计算而来的,对其进行关联性研究的本质是对 ESV 与 ER 之间的相互作用分析,但尚未能很好地阐释清楚两者之间的内在机理问题。今后的相关研究可以从生态系统功能特性出发,建立其与生态系统服务之间的联系,利用耦合协调度模型,测度各服务类型之间的关系。其次尚未揭示二者与居民福祉的内在关系。流域内各生态系统的景观格局是人地关系相互作用的结果,所在地居民的主观意愿与行为会对其产生影响。因此可结合量化与质性研究方法,深入了解流域生态系统服务供需关系以及它们的实际空间流动规律,对这些规律的深入理解将有利于更好地阐述流域生态系统对居民福祉的真正贡献,并为流域生态系统管理和决策提供科学依据。

## 4.2 结论

(1) 自研究基期起,研究区土地资源开发强度不断加大,6 大地类均发生相关改变,其中建设用地和农田变化最为剧烈,前者面积转入 1 488 km<sup>2</sup>,后者面积转出 1 763 km<sup>2</sup>。

(2) 研究区生态系统服务价值总量呈波动上升趋势。研究期内 ESV 总量增加 4.47×10<sup>9</sup> 元,增长率达 14.26%。ESV 高值区主要分布于研究区西南部六安市境内和淮河干支流两岸。在各地类对 ESV 贡献比例中,农田和水域贡献比例最高,比例高于 70%。在各单项 ESV 贡献率中,以调节服务 ESV 占主导,占比约 54%。

(3) 研究期内,研究区生态风险指数整体水平波

动较小,ER 均值浮动控制在 0.01 范围内,区域整体生态安全格局较稳定。生态风险指数空间分布呈现出中部高、西南低特征,其中高风险区主要位于人口密度高、土地覆盖类型以不透水面为主的城镇建设区范围。

(4) 研究区格网单元 ESV 与 ER 指标呈负向空间关联性,即生态系统服务价值总量上升时,生态风险指数则趋于下降。2000—2019 年高价值—高风险区、低价值—高风险区、低价值—低风险区面积整体呈波动下降趋势,高价值—低风险区、不显著区面积逐渐上升。研究区 ESV 总量的增加意味着区域生态环境的改善以及流域综合治理效果的显现,与此同时 ER 指数较高则说明其生态系统功能和结构存在潜在受损的可能。因此在高、较高生态风险区的发展建设中应注意对区域生态环境的保护以及对生态风险水平的管控。

(5) 本文基于动态变量法测度 ESV 与 ER 时空格局演化过程,并采用探索性数据分析测度二者空间关联性。在后续研究中可以进一步探究 ESV 与 ER 的内在机理问题,以及二者与居民福祉的联系。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] Ahmed M T. Millennium ecosystem assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2002, 9(4): 219-220.
- [3] 谢高地,肖玉,鲁春霞.生态系统服务研究:进展、局限和基本范式[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191-199.
- [4] 欧阳志云,郑华.生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [5] 洪银兴,刘伟,高培勇,等.“习近平新时代中国特色社会主义思想”笔谈[J]. *中国社会科学*, 2018(9): 4-73, 204-205.
- [6] 黄勤,曾元,江琴.中国推进生态文明建设的研究进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(2): 111-120.
- [7] 周伟,官炎俊,刘琪,等.黄土高原典型流域生态问题诊断与系统修复实践探讨:以山西汾河中上游试点项目为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8817-8825.
- [8] 王灵恩,何露,成升魁,等.澜沧江流域旅游资源空间分异与发展模式探讨[J]. *资源科学*, 2012, 34(7): 1266-1276.
- [9] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [10] Richardson L, Loomis J, Kroeger T, et al. The role of benefit transfer in ecosystem service valuation [J]. *Ecological Economics*, 2015, 115: 51-58.
- [11] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015 年大别山区生态

- 服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].地理学报, 2019, 74(9):1904-1920.
- [12] 谢丽霞,白永平,车磊,等.基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设[J].自然资源学报, 2021, 36(1):196-207.
- [13] 刘倩,李葛,张超,等.基于系数修正的青龙县生态系统服务价值动态变化研究[J].中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6):971-980.
- [14] 邹紫荆,曾辉.基于 meta 分析的中国森林生态系统服务价值评估[J].生态学报, 2021, 41(14):5533-5545.
- [15] 陈心盟,王晓峰,冯晓明,等.青藏高原生态系统服务权衡与协同关系[J].地理研究, 2021, 40(1):18-34.
- [16] Hu Mengmeng, Li Zhaotian, Wang Yafei, et al. Spatio-temporal changes in ecosystem service value in response to land-use/cover changes in the Pearl River Delta [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 149: 106-114.
- [17] Zhang Fei, Yushanjiang A, Jing Yunqing. Assessing and predicting changes of the ecosystem service values based on land use/cover change in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 656:1133-1144.
- [18] 宋洁,温璐,王凤歌,等.乌兰布和沙漠生态系统服务价值时空动态[J].生态学报, 2021, 41(6): 2201-2211.
- [19] 张晓瑶,陆林,虞虎,等.青藏高原土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟[J].生态学杂志, 2021, 40(3):887-898.
- [20] 曾欣,张玉玲,贾晓宇,等.永定河上游流域水生态系统服务价值评估[J].自然资源学报, 2020, 35(6):1326-1337.
- [21] Yang Wenrui, Wang Rusong, Huang Jinlou, et al. Ecological risk assessment and its research progress [J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8):1869-1876.
- [22] 胡云锋,高戈.城市景观生态风险评估框架与实践:以北京天坛地区为例[J].生态学报, 2020, 40(21):7805-7815.
- [23] 祝薇,向雪琴,侯丽朋,等.基于 Citespace 软件的生态风险知识图谱分析[J].生态学报, 2018, 38(12):4504-4515.
- [24] Tian Jingyi, Gang Gengshi. Research on regional ecological security assessment [J]. Energy Procedia, 2012, 16:1180-1186.
- [25] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报, 2015, 30(8):1243-1254.
- [26] 胡喜生,洪伟,吴承祯.土地生态系统服务功能价值动态估算模型的改进与应用:以福州市为例[J].资源科学, 2013, 35(1):30-41.
- [27] 奚立平,张乐勤,李荣富.安徽省淮河流域湿地土壤养分流失及水质动态研究[J].水土保持学报, 2016, 30(1): 131-136.
- [28] 王文,胡彦君,徐川怡.1961—2018 年淮河流域热浪事件时空变化特征[J].地理科学, 2021, 41(5):911-921.
- [29] 孙朋,渠玮娟,朱玺,等.1959—2018 年淮河流域水热格局差异研究[J].长江流域资源与环境, 2021, 30(6): 1366-1377.
- [30] 汪佩.安徽省淮河流域行蓄洪生态功能区可持续发展初步研究[D].安徽 合肥:合肥工业大学, 2007.
- [31] 苏海民,何爱霞.基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J].自然资源学报, 2010, 25(1):91-99.
- [32] 张艳春,毛旭烽,魏晓燕,等.淠水国家湿地公园湿地价值及其辐射格局研究[J].生态学报, 2022, 42(2):569-580.
- [33] 王若思,潘洪义,刘翊涵,等.基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究[J].生态学报, 2022, 42(1):76-90.
- [34] Goodchild M F. The fundamental laws of GIScience [R]. Invited talk at University Consortium for Geographic Information Science, University of California, Santa Barbara, 2003.
- [35] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报, 2003, 18(2):189-196.
- [36] 崔林丽,史军,肖风劲.气候要素及 El Nino/La Nina 事件对中国陆地 NPP 变化的影响[J].地理学报, 2018, 73(1):54-66.
- [37] 左玲丽,彭文甫,陶帅,等.岷江上游土地利用与生态系统服务价值的动态变化[J].生态学报, 2021, 41(16): 6384-6397.
- [38] 李俊翰,高明秀.滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J].生态学报, 2019, 39(21): 7815-7828.
- [39] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等.黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性:以子午岭区为例[J].应用生态学报, 2021, 32(5):1623-1632.
- [40] 马晓熠,裴韬.基于探索性空间数据分析方法的北京市区域经济差异[J].地理科学进展, 2010, 29(12):1555-1561.
- [41] 徐羽,钟业喜,冯兴华,等.鄱阳湖流域土地利用生态风险格局[J].生态学报, 2016, 36(23):7850-7857.
- [42] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. Economic Geography, 1970, 46(S1):234-240.
- [43] 潘洪义,张琴,李加安,等.基于动态当量的彝汉交错深度贫困区生态系统服务价值时空演变研究[J].生态学报, 2020, 40(22):8218-8229.
- [44] 雷军成,王莎,汪金梅,等.土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响[J].生态学报, 2019, 39(9):3089-3099.
- [45] 姜栋栋,马伟波,邹凤丽,等.乡镇尺度大娄山区生态系统服务价值时空变化研究[J].环境科学研究, 2020, 33(12):2713-2723.