



余漫, 蔡海生, 余艳. 基于 InVEST 模型的赣州市生态系统服务时空演变及权衡与协同分析[J]. 江西农业大学学报, 2026, 48(1): 262–274.

YU M, CAI H S, SHE Y. Spatial-temporal evolution, trade-offs and synergy analysis of Ganzhou ecosystem services based on InVEST model[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2026, 48(1): 262–274.

基于 InVEST 模型的赣州市生态系统服务 时空演变及权衡与协同分析

余漫^{1,2}, 蔡海生^{1,3*}, 余艳⁴

(1. 江西农业大学 国土资源与环境学院/江西省自然资源利用科技与管理创新研究基地/富硒农业产业发展研究中心, 江西 南昌 330045; 2. 中共江西省委党校, 江西 南昌 330108; 3. 宜春学院, 江西 宜春 336000; 4. 江西省国土空间调查规划研究院, 江西 南昌 330025)

摘要:【目的】量化江西省赣州市生态系统服务对土地利用变化的时空响应, 解析其权衡协同关系, 以期为国土空间优化与生态安全格局构建、支撑区域可持续发展提供参考。【方法】基于 2005 年、2015 年和 2023 年的遥感数据, 利用 InVEST 模型测算了赣州市的生境质量、产水量、土壤保持和碳储量, 利用热点分析探讨了生态系统服务的变化。利用 Pearson 相关系数、权衡协同度和差异比较法分析生态系统服务之间的权衡与协同关系, 并从土地利用变化的角度剖析了原因。【结果】(1) 赣州市土地利用结构以林地为主, 占 74% 以上。2005—2023 年建设用地面积增加最多, 为 330.94 km², 动态度为 4.83%; 2005—2015 年林地每年转出 59.68 km²; 2015—2023 年耕地面积每年增加 34.41 km²。(2) 2005—2023 年, 赣州市生境质量、产水量、土壤保持和碳储量每年分别下降了 0.000 2、3.170 7 mm、21.893 0 t/km² 和 5.154 7 t/km²。4 种生态系统服务之间空间分布存在差异性。1 类、2 类和 3 类热点区域面积占总面积 90% 左右。(3) 赣州市生态系统服务之间以协同关系为主, 但存在差异, 不同时间截面的生态系统服务之间的权衡与协同关系相同, 不同时间段的生态系统服务之间的权衡与协同关系不一定相同。(4) 同一土地利用类型的生态系统服务之间的构成基本维持稳定, 而不同的土地利用变化对生态系统服务的影响程度不同, 如建设用地和林地相互转换对碳储量影响最大。【结论】赣州市土地利用变化是生态系统服务空间格局演变的核心驱动因素, 其引发的服务间权衡与协同关系, 反映了土地开发与生态保护的内在博弈。为实现区域可持续发展, 必须超越发展与保护的对立思维, 将上述规律作为空间管控的科学依据, 通过优化国土空间格局来主动调控, 推动区域迈向高质量发展。

关键词: 生态系统服务; 土地利用变化; 时空演变; 权衡与协同; 赣州市

中图分类号: X171.1 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2026)01-0262-13

CSTR: 32399.14.aauj.2026023



Spatial-temporal evolution, trade-offs and synergy analysis of Ganzhou ecosystem services based on InVEST model

YU Man^{1,2}, CAI Haisheng^{1,3*}, SHE Yan⁴

收稿日期: 2025-07-22 修回日期: 2025-10-06 接受日期: 2025-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660140)和江西省社科基金项目(25YJ13)

Project supported by National Natural Science Foundation of China(31660140) and Social Science Foundation of Jiangxi Province(25YJ13)

作者简介: 余漫, 博士生, orcid.org/0009-0003-8279-3146, yuman0424@163.com; *通信作者: 蔡海生, 教授, 博士, 主要从事土地生态、土地经济研究, orcid.org/0000-0002-6707-7999, caihs1972@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1.School of Land Resources and Environment/Jiangxi Provincial Innovation Research Base of Natural Resource Utilization Science and Management/Research Center for Selenium-enriched Agricultural Industry Development, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Party School of Jiangxi Provincial Committee of C.P.C, Nanchang 330108, China; 3.Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China; 4.Jiangxi Institute of Land Space Survey and Planning, Nanchang 330025, China)

Abstract: [Objective] To quantify the spatiotemporal response of ecosystem services to land use change in Ganzhou City and analyze their trade-off and synergy relationships, providing reference for optimizing the national land space, constructing an ecological security pattern, and achieving sustainable development in Ganzhou City. [Method] Based on remote sensing data in 2005, 2015 and 2023, the InVEST model was used to evaluate the habitat quality, water yield, soil conservation, and carbon storage in Ganzhou City and hotspot analysis method was used to analyze changes in ecosystem services. Pearson correlation coefficient, trade-off synergy and contrastive analysis approach were used to the trade-off and synergy relationships among ecosystem services, and the reasons were analyzed from the perspective of land use change. [Result] (1) The land structure in Ganzhou City is dominated by forest land, accounting for over 74%. The construction land increased the most from 2005 to 2023, reaching 330.94 km² with a dynamic degree of 4.83%; From 2005 to 2015, 59.68 km² of forest land was transferred to other types of land use annually; The cultivated land increased by 34.41 km² annually from 2015 to 2023. (2) From 2005 to 2023, the habitat quality, water production, soil conservation, and carbon storage in Ganzhou City have decreased by 0.000 2, 3.170 7 mm, 21.893 0 t/km² and 5.154 7 t/km² annually. There are differences in spatial distribution among the four ecosystem services. The area of hotspots in categories 1, 2 and 3 accounts for about 90% of the total area. (3) The ecosystem services in Ganzhou City mainly had a synergy relationship, but also had little differences. The trade-offs and synergy relationships among ecosystem services in different time sections are the same, while those among ecosystem services in different time periods may not be the same. (4) The composition of ecosystem services in the same land use type is basically stable, while different land use changes have different impacts on ecosystem services. For example, the conversion between construction land and forest land has the greatest impact on carbon storage. [Conclusion] The land use change in Ganzhou City is the core driving factor for the evolution of the spatial pattern of ecosystem services, and the resulting trade-offs and synergies between services reflect the inherent tension between land development and ecological protection. To achieve regional sustainable development, it is necessary to go beyond the contradictory thinking of development and protection, taking the above laws as the scientific basis for spatial control, promoting the region towards high-quality development through optimizing the national spatial pattern.

Keywords: ecosystem services; land use changes; spatial-temporal evolution; trade-offs and synergy; Ganzhou City

【研究意义】生态系统服务是指人类从生态系统中直接或间接获得的各种产品和服务,在人类的生存和发展中发挥着无可替代的作用^[1-2]。生态系统服务种类繁多,且彼此之间存在着此消彼长的权衡关系和同增同减的协同关系^[3]。土地利用变化是人类活动和自然环境之间相互作用的结果,会改变自然生态环境的原有状态,从而影响到生态系统服务的供给,并进一步影响生态系统服务之间的权衡与协同关系^[4]。定量衡量不同土地利用变化造成的生态系统服务及其权衡与协同关系变化,对于改善生态环境问题,优化生态系统服务空间格局,促进社会可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】现有关于生态系统服务的研究主要涉及土地利用变化背景下生态系统服务的分类、评估、时空演变、驱动因素、未来预测、权衡与协同等方面^[5-6],涵盖了全球、国家^[7]、区域^[8]、流域^[9]以及单一生态系统等多种尺度。如:张家其等^[10]预测了 2030 年不同土地利用发展情景下的生态系统服务供需时空演化格局;朱丹丹等^[11]通过构建动态权衡协同度,量化了生态系统服务变化量的权衡与协同关系的强度及方向;张宇等^[12]采用当量因子

法估算了鄂尔多斯市的不同土地利用类型的生态系统服务价值,并分析了土地利用变化对其的影响。既有研究都证实了土地利用变化会影响生态系统服务及其权衡与协同关系,但土地利用类型之间的相互转移是如何对生态系统服务造成影响,以及如何量化不同土地利用类型之间的相互转移对不同生态系统服务的影响程度,是进一步优化生态系统服务的关键。

【本研究切入点】江西省赣州市是我国重要的稀土矿产开发和生产基地,矿区的过度开采及城镇经济的快速发展,导致出现严重的水土流失、生态质量下降等生态问题。在实施了矿山生态修复、小流域治理、山水林田湖草生态保护修复等一系列的生态修复工程后,赣州市生态环境得到有效改善。无论是矿区开采及城市开发对生态环境的破坏,还是生态工程对生态环境的修复,均是土地利用变化导致的生态系统服务及其权衡与协同关系变化。但当前赣州市生态系统服务的相关研究并没有对土地利用变化造成的生态系统服务影响程度进行量化。【拟解决的关键问题】本研究通过分析 2005—2023 年赣州市土地利用结构变化及转移情况,测算多种生态系统服务及其权衡与协同关系,并进行空间变化分析,探究土地利用变化是如何造成生态系统服务及其权衡与协同变化,为生态环境修复,国土空间可持续发展提供理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

赣州市位于江西省南部,24°29′~27°09′N、113°54′~116°38′E,国土面积 39 379.64 km²,占江西省总面积 23.6%,是全省面积最大、人口最多的地级市。赣州市地形地貌以山地、丘陵、盆地为主,属于亚热带季风气候区,具有丘陵山区的湿热特点,受季风盛行影响,降水集中且充沛,热量丰富,无霜期长,气候温和,温度适宜,多年平均降水量为 1 580.2 mm,多年平均温度 19.8 ℃。赣州市地处我国“两屏三带”生态战略布局中的南方丘陵山地带的核心位置,同时也属于我国南方红壤区,是南方生态保护的重要屏障。

1.2 数据来源

本研究所用数据主要包括土地利用数据、气象数据、土壤数据、地形数据等(表 1),所有数据最终统一处理为空间分辨率 30 m,坐标系为 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_39。

表 1 研究数据来源
Tab.1 Sources of the data

数据类型 Data type	数据来源 Source of the data	数据格式 Data format
行政区划数据 Administrative division data	江西省自然资源厅	shp 矢量文件
土地利用数据 Land use data	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/), 包括 2005、2015 和 2023 年 3 期	tiff 栅格文件
气象数据 Meteorological data	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/oldindex.html), 包括 2005、2015 和 2023 年 3 期	tiff 栅格文件
土壤数据 Soil data	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/)	tiff 栅格文件
地形数据 Terrain data	地理空间云(https://www.gscloud.cn/)	tiff 栅格文件

2 研究方法

2.1 土地利用变化分析

土地利用变化分析通过土地利用动态度和土地利用转移矩阵 2 个指标来衡量。土地利用动态度能够定量反映某种土地利用类型在一定时间内的变化速度^[13],计算公式如下:

$$K = \left(\frac{U_b - U_a}{U_a} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

①

式①中: K 为研究时段内某一土地利用类型动态度,属无量纲指标; U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期某一土地利用类型的面积, km^2 ; T 为研究时段,当 T 时段为年时, K 为该项目区某种土地利用类型的年变化率。

土地利用转移矩阵则能够反映区域内某一土地利用类型转移的方向和面积大小,计算公式如下:

$$\left(S_{ij}\right)_{n \times n}=\left[\begin{array}{cccc} S_{11} S_{12} & \cdots & S_{1 n} \\ S_{21} S_{22} & \cdots & S_{2 n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n 1} S_{n 2} & \cdots & S_{n n} \end{array}\right]$$

②

式②中: S_{ij} 为*i*类土地转换为*j*类土地的面积; n 为土地利用类型数量。

2.2 基于 InVEST 模型的生态系统服务评估

生态系统服务评估主要是通过 InVEST 模型进行定量模拟,涉及生境质量、产水量、土壤保持和碳存储 4 个子模块,其计算公式如表 2 所示。

表 2 基于 InVEST 模型的生态系统服务测算
Tab.2 Estimation of ecosystem services based on the InVEST model

生态系统服务 Ecosystem services	计算公式 Calculation formula	变量解释 Explanation of variables
生境质量 Habitat quality	$Q_{sj}=H_j\left(1-\frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z+k^z}\right)$	式中: Q_{sj} 为第 <i>j</i> 种土地利用类型中栅格 <i>x</i> 的生境质量; H_j 为第 <i>j</i> 种土地利用类型的生境适宜性; D_{sj} 为第 <i>j</i> 种土地利用类型中栅格 <i>x</i> 的生境退化度; k 指半饱和参数。生境质量值为 0~1,属无量纲指标,值越高,栖息地质量愈高,退化程度愈低 ^[14-15] 。
产水量 Water yield	$Y_x=\left(1-\frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x$ $\frac{AET_x}{P_x}=1+\frac{PET_x}{P_x}-\left[1+\left(\frac{PET_x}{P_x}\right)^W\right]^{\frac{1}{W}}$ $W=Z \times \frac{AWC_x}{P_x}+1.25$	式中: Y_x 为研究区栅格单元 <i>x</i> 的年产水量; P_x 为年降水量; AET_x 为年实际蒸散量; AWC_x 为植被可利用水量 ^[16] ; W 为非物理参数; Z 为 Zhang 系数,是季节常数,范围为 1~30。
土壤保持 Soil conservation	$SR=RKLS-USLE$ $RKLS=R \times K \times LS$ $USLE=R \times K \times LS \times C \times P$	式中:SR 为土壤保持量;RKLS 为潜在土壤侵蚀量;USLE 为实际土壤侵蚀; R 为降雨侵蚀性因子,采用周伏健提出的适宜中国南方地区的公式; K 为土壤侵蚀性因子,利用 EPIC 模型估算; LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖和作物管理因子 ^[17-18] ; P 为水土保持措施因子 ^[19-20] 。
碳储量 Carbon storage	$C_i=C_{i-\text { above }}+C_{i-\text { below }}+C_{i-\text { soil }}+C_{i-\text { dead }}$ $C_{\text { tot }}=\sum_{i=1}^n C_i \times S_i$	式中: i 为某种土地利用类型; C_i 为第 <i>i</i> 类土地利用类型碳密度; $C_{i-\text { above }}$ 、 $C_{i-\text { below }}$ 、 $C_{i-\text { soil }}$ 、 $C_{i-\text { dead }}$ 为第 <i>i</i> 类土地利用类型的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度、枯落物碳密度 ^[21-22] ; $C_{\text { tot }}$ 为总碳储量; S_i 为第 <i>i</i> 类土地利用类型的面积; n 为土地利用类型数量。

2.3 热点分析

热点分析可以进一步分析生态系统服务的综合情况。将生态系统服务大于其平均值的栅格视为该服务的热点区域,利用叠加分析将生境质量、产水量、土壤保持和碳储量进行热点区域识别,最终将整个区域划分为非热点区和 1~4 类热点区。其中,非热点区为没有大于平均值的区域;1 类热点区为有一种生态系统服务大于平均值的区域;2 类热点区为有 2 种生态系统服务大于平均值的区域;3 类热点区为有 3 种生态系统服务大于平均值的区域;4 类热点区为 4 种生态系统服务均大于平均值的区域。

2.4 生态系统服务的权衡与协同分析

(1) Pearson 相关系数。按照两点距离不小于栅格大小(30 m)的原则,随机生成 100 个样本点,并提取各点位的生态服务值进行两两相关性分析。当相关系数为负时,则表现为权衡关系;当相关系数为正时,则表现为协同关系。

(2) 权衡协同度。用于揭示一段时间内生态系统服务的权衡与协同关系, 计算公式如下:

$$ESCI_i = \frac{ES_{ia} - ES_{ib}}{ES_{ib}}$$
③

$$ESCI_j = \frac{ES_{ja} - ES_{jb}}{ES_{jb}}$$
④

$$ESTD_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{ESCI_i}{ESCI_j} + \frac{ESCI_j}{ESCI_i} \right)$$
⑤

式③、式④和式⑤中: $ESCI_i$ 为第 i 种生态系统服务的变化指数; ES_{ia} 和 ES_{ib} 分别为初始时刻和最终时刻第 i 种生态系统服务的值; $ESTD_{ij}$ 为 i 和 j 2 种生态系统服务的权衡协同度。当 $ESTD_{ij}$ 为正值时, 说明生态系统服务之间为协同关系; 当 $ESTD_{ij}$ 为负值时, 说明生态系统服务之间为权衡关系。

(3) 差异比较法。用于展示一段时间内生态系统服务权衡与协同关系的空间分布特征, 计算公式如下:

$$\Delta ES_i = ES_{ia} - ES_{ib}$$
⑥

$$\Delta ES_j = ES_{ja} - ES_{jb}$$
⑦

$$C = \Delta ES_i - \Delta ES_j$$
⑧

式⑥、式⑦和式⑧中: ΔES_i 为第 i 种生态系统服务的变化差值别。如果 $C = 0$, 则表示为兼容关系; 如果 $C < 0$, 则表现为权衡关系; 如果 $C > 0$ 且 ΔES_i 和 ΔES_j 均大于 0, 则表现为正协同关系; 如果 $C > 0$ 且 ΔES_i 和 ΔES_j 均小于 0, 则表现为负协同关系。

3 结果与分析

3.1 土地利用结构及转移情况

2005—2023 年赣州市土地利用结构整体相对稳定(表 3)。林地在赣州市土地利用类型中面积占比最大, 占全市土地面积的 74% 以上, 动态度变化幅度在所有地类中最小, 仅为 -0.06%。其次是耕地, 占全市土地面积的 17% 以上, 动态度变化幅度仅高于林地, 为 0.16%。2005—2015 年和 2015—2023 年动态度分别为 -0.11% 和 0.50%, 表明耕地数量先减少后增加。面积占比最小的是草地、建设用地和水域, 占全市土地面积分别低于 6%、2% 和 1%。建设用地动态度在所有地类中变化最大, 达到 4.83%, 表现为面积持续增加; 水域的动态度变化幅度仅次于建设用地, 为 -1.28%, 表现为面积先增加后减少; 草地的整体动态度变化为 -0.33%, 表现为面积持续减少。

表 3 2005—2023 年赣州市土地利用变化及动态度
Tab.3 Land use change and dynamics in Ganzhou City from 2005 to 2023

土地利用类型 Land use type	2005		2015		2023		动态度/% Dynamic		
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	2005—2015	2015—2023	2005—2023
	Area	Percent age	Area	Percent age	Area	Percent age			
耕地 Cultivated land	6 959.99	17.67	6 884.30	17.47	7 159.58	18.17	-0.11	0.50	0.16
林地 Forest land	29 485.11	74.84	29 409.91	74.65	29 172.10	74.05	-0.03	-0.10	-0.06
草地 Grassland	2 186.92	5.55	2 161.55	5.49	2 057.59	5.22	-0.12	-0.60	-0.33
水域 Water land	381.54	0.97	382.49	0.97	293.71	0.75	0.02	-2.90	-1.28
建设用地 Construction land	380.45	0.96	555.78	1.41	711.39	1.81	4.61	3.50	4.83
未利用地 Unused land	2.16	0.01	2.14	0.01	1.80	0	-0.09	-1.99	-0.93

耕地、林地和建设用地存在明显的空间置换(图 1)。2005—2015 年,耕地每年以 7.57 km²的速度减少,减少速度在所有地类中最快,主要是由于城镇发展及“退耕还林”政策的实施,每年耕地向林地和建设用地分别转出 39.84 km²和 12.79 km²。林地每年转出转入面积在所有地类中最大,分别为 59.68 km²和 52.15 km²。向耕地、草地和建设用地分别转出了 41.60,9.42,7.29 km²;转入则来自耕地(39.84 km²)和草地(10.35 km²)。建设用地是每年增长面积最大的地类,为 17.53 km²。水域和未利用地的转入转出面积最小。2015—2023 年,随着耕地保护的力度不断加大,耕地每年增长面积和转入面积在所有地类中最大,分别为 34.41 km²和 135.93 km²,主要是来源于林地、草地和建设用地,分别转入了 99.93,17.01,12.81 km²。建设用地在所有地类中每年增长面积仅次于耕地,为 19.45 km²,主要来源于城镇周边的耕地和林地,分别转入了 17.45 km²和 12.80 km²。林地的每年转出面积在所有地类中最大,达到 140.43 km²,主要是转为耕地、草地和建设用地。总体来说,2015—2023 年各种地类的年均变化大于 2005—2015 年,表明 2015—2023 年人类活动对土地类型的影响大于 2005—2015 年。

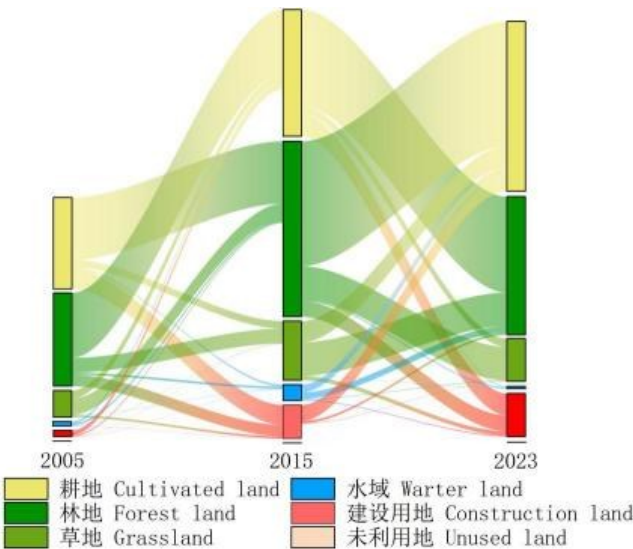


图 1 2005—2023 年赣州市土地利用年均转移矩阵

Fig.1 Annual land use transition matrix of Ganzhou City from 2005 to 2015

3.2 生态系统服务变化

3.2.1 生态系统服务时空变化

利用 InVEST 模型的生境质量、产水量、土壤保持和碳存储 4 个子模块,测算 2005—2023 年赣州市的生态系统服务(表 4、图 2)。

表 4 2005—2023 年赣州市生态系统服务测算

Tab.4 Estimation of ecosystem services in Ganzhou City from 2005 to 2023

生态系统服务 Ecosystem services	生境质量 Habitat quality	产水量/mm Water yield	土壤保持/(t·km ⁻²) Soil conservation	碳储量/(t·km ⁻²) Carbon storage
2005	0.620 2	780.722 6	16 725.152 8	11 733.138 8
2015	0.618 1	838.230 0	17 213.724 9	11 692.777 2
2023	0.616 4	723.649 2	16 331.079 1	11 640.353 7
2005—2015 年年均变化量 Average annual change from 2005 to 2015	-0.000 2	5.750 7	48.857 2	-4.036 2
2015—2023 年年均变化量 Average annual change from 2015 to 2023	-0.000 2	-14.322 6	-110.330 7	-6.552 9
2005—2023 年年均变化量 Average annual change from 2005 to 2023	-0.000 2	-3.170 7	-21.893 0	-5.154 7

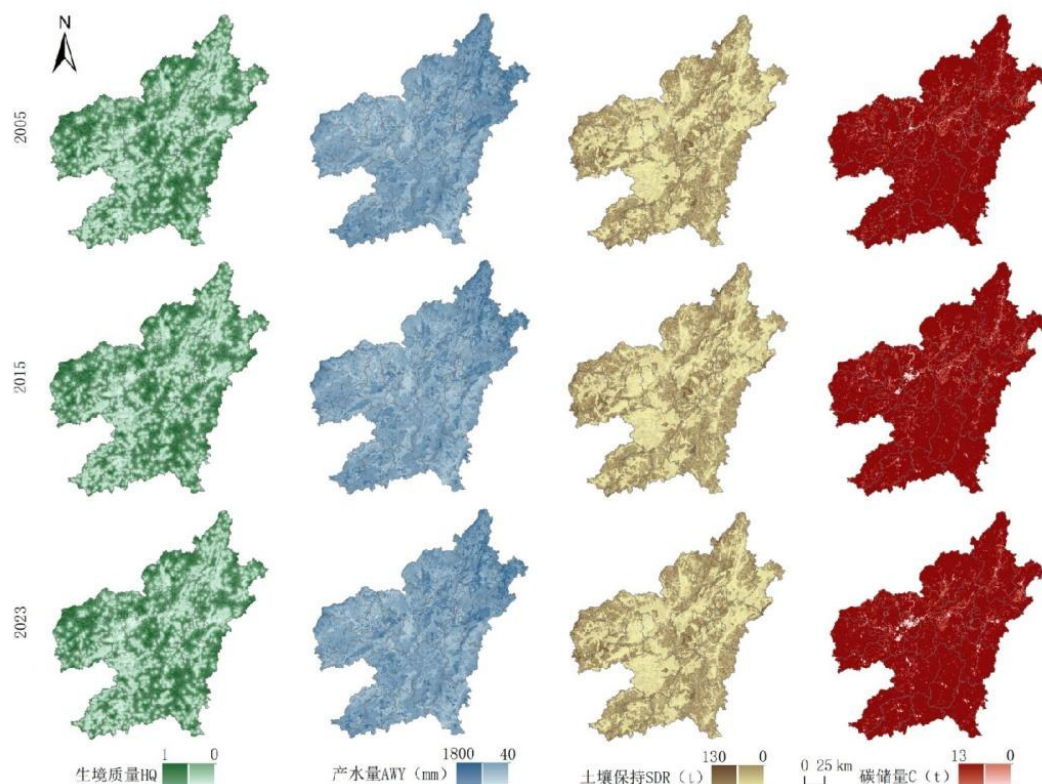


图2 2005—2023年赣州市生态系统服务空间格局

Fig.2 Spatial pattern of ecosystem services in Ganzhou City from 2005 to 2023

2005—2023年赣州市生境质量呈现出持续下降的趋势,从2005年平均生境质量的0.620 2下降到2023年的0.616 4,反映了赣州市随着城市化和工业化的发展,生境质量不断降低。2005—2015年和2005—2023年,赣州市生境质量年均下降的速度相同,然而,2005—2023年建设用地增加的速度大于2005—2015年,表明赣州市从2016年开始开展的一系列生态修复工程有助于缓解城市化发展对生境质量的影响。研究期间,赣州市生境质量存在空间分异特征,林地覆盖面积大的区域生境质量高,而城镇化水平高的区域生境质量则低。

2005—2023年赣州市产水量呈现出先增加后减少的趋势,空间特征为东北部高、西南部低。2005—2015年,产水量从780.722 6 mm上升到838.230 0 mm,主要是由于降水量增加;2015—2023年,产水量从838.230 0 mm下降到723.649 2 mm,下降的速度快于2005—2015年的增加速度,主要是由于降水量大量减少及人类活动的影响。

2005—2023年赣州市土壤保持和产水量呈现出相似的动态特征,表现为先增加后减少。2005—2015年土壤保持从16 725.152 8 t/km²上升到17 213.724 9 t/km²,主要是人类活动对生态环境的破坏相对较少;到2023年,又下降到16 331.079 1 t/km²,主要是人类活动造成的建设用地和耕地面积增加、林地面积减少,导致土壤保持能力不断下降。从空间上来看,高值区主要集中在森林覆盖度较高的区域,土壤保持能力较强;低值区主要分布在城镇化及农田区域,土壤保持能力相对较弱。

2005—2023年赣州市碳储量和生境质量呈现出相似的动态特征,表现为持续下降。从2005年平均碳储量11 733 t/km²下降到2023年11 640 t/km²,且下降速度不断加快,主要是由于林地面积的减少造成固碳能力减弱。空间上来看,南部地区碳储量高于北部地区,最低值主要集中在中部建设用地密集区域。

3.2.2 生态系统服务的热点分析

2005—2023年赣州市生态系统服务热点区时空变化整体较为稳定(图3)。1类、2类和3类热点区域面积最大。1类热点区面积持续增加,2005—2015年增加了1个百分点,2015—2023年增加了0.3个百分点;2类和3类热点区面积表现为先减少后增加,2005—2015年分别减少了0.3个百分点和0.5个百分点,2015—2023年分别增加了0.2个百分点和1.1个百分点。非热点区和4类热点区的面积占比较少,均表

现为持续减少趋势,且减少的速度不断加快。4类热点区 2005—2015 年和 2015—2023 年分别减少了 0.2 个百分点和 1.4 个百分点;非热点区 2005—2015 年和 2015—2023 年均减少了 0.1 个百分点。从空间上来看,非热点区域和 1~4 类热点区是按顺序依次分布,4 类热点区集中在森林覆盖率高的区域,非热点区集中在建设用地区域,1 类、2 类和 3 类热点区处于中间区域。

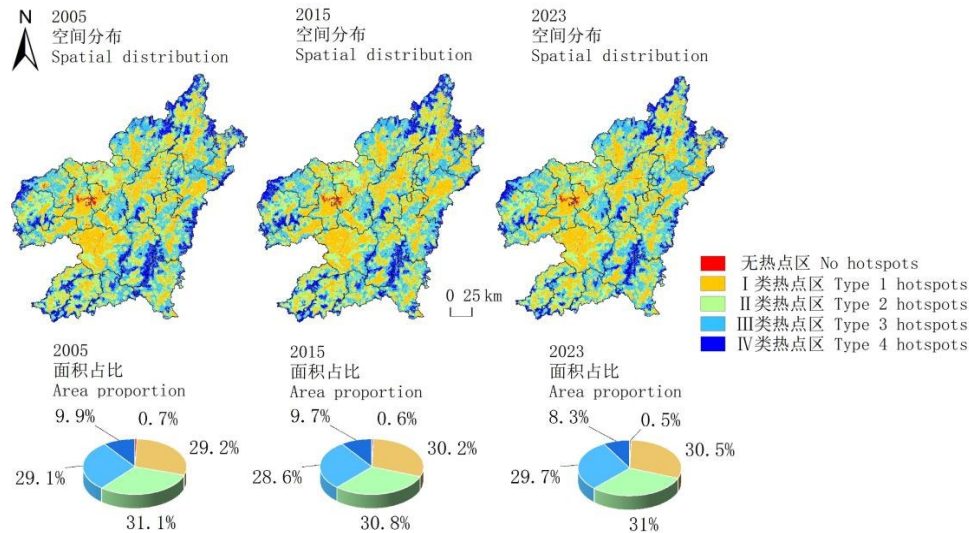


图3 2005—2023 年赣州市生态系统服务热点区域空间分布及面积占比

Fig.3 Spatial distribution and area proportion of ecosystem service hotspots in Ganzhou City from 2005 to 2023

3.3 生态系统服务权衡与协同关系

3.3.1 基于 Pearson 相关系数的生态系统服务权衡与协同关系

通过计算生态系统服务两两之间的 Pearson 相关系数来分析赣州市生态系统服务之间的权衡与协同关系(图4)。总体而言,2005、2015 和 2023 年赣州市生态系统服务两两之间的相关性均通过了 0.01 水平的显著性检验,且相关系数的年际间波动较小,表明服务之间的权衡与协同关系较为稳定。生境质量与碳储量表现为中度协同关系,相关系数分别为 0.58、0.61 和 0.63,相关性逐步提高;生境质量与土壤保持、土壤保持与碳储量均为低度协同关系,前者相关系数保持 0.36 不变,后者相关系数分别为 0.35、0.36 和 0.36;产水量与碳储量之间为中度权衡关系,相关系数分别为-0.57、-0.59 和-0.66,相关性逐步提高;生境质量与产水量之间为低度权衡关系,相关系数分别为-0.35、-0.36 和-0.42,相关性逐步提高;产水量与土壤保持之间相关系数小于 0.3,相关性较弱。

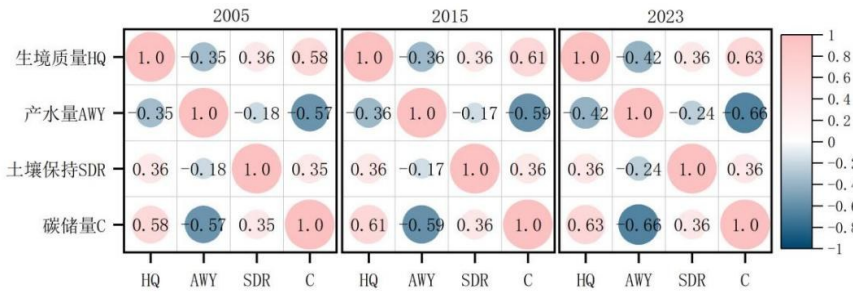


图4 2005—2023 年赣州市生态系统服务 Pearson 相关系数

Fig.4 Pearson correlation coefficients of ecosystem services in Ganzhou City from 2005 to 2023

3.3.2 生态系统服务的权衡协调度

通过权衡协同度模型计算了 2005—2015 年和 2015—2023 年 2 个时间段赣州市生态系统服务之间的权衡与协同关系(图5)。2005—2015 年,赣州市生态系统服务之间的权衡协同度构成 6 组值,2 组正值、4 组负值,表明赣州市生态系统服务之间以权衡关系为主。权衡度由高到低排序分别是生境质量与产水量(-10.9)、产水量与碳储量(-10.73)、生境质量与土壤保持(-4.37)、土壤保持与碳储量(-4.3);协同度由高到低排序分别为产水量与土壤保持(1.46)、生境质量与碳储量(1)。2015—2023 年,赣州市生态系统

服务之间的权衡协同度均为正值,即均表现为协同关系。协同度由高到低的排序分别是生境质量与产水量(24.86)、产水量与碳储量(15.26)、生境质量与土壤保持(9.35)、土壤保持与碳储量(5.76)、产水量与土壤保持(1.52)、生境质量与碳储量(1.12)。前4组排序与2005—2015年的权衡度排序一样,协同度最低的2组在2005—2015年也为协同关系,且排序相同。

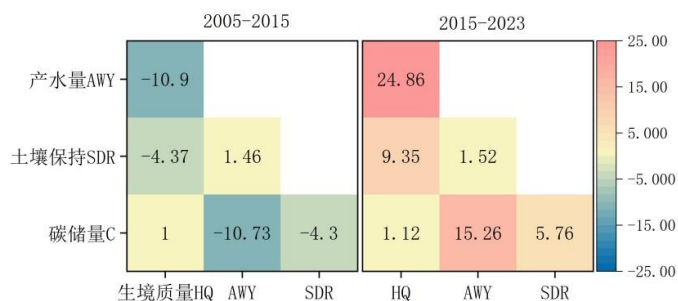


图5 2005—2023年赣州市生态系统服务权衡协同度

Fig.5 Trade-offs and synergies of ecosystem services in Ganzhou City from 2005 to 2023

3.3.3 生态系统服务的权衡协同空间分布

运用差异比较法计算2005—2015年和2015—2023年赣州市生态系统服务之间的权衡与协同关系空间分布特征(图6)。生境质量与碳储量在2个时间段空间分布均为负协同为主,正协同区域零星分布在全市内,且2015—2023年分布面积大于2005—2015年,权衡区域几乎没有。产水量与土壤保持在2个时间段空间分布以协同为主,2005—2015年以正协同为主,负协同集中在中东部地区,权衡集中在正协同和负协同中间的交汇地带;2015—2023年则完全相反,以负协同为主,正协同集中在中部地区新增建设用地密集处。其余4组生态系统服务关系具有相似的空间分布特征,2005—2015年以权衡为主,负协同集中在中东部地区;2015—2023年则完全相反,以负协同为主,权衡集中在中部地区新增建设用地密集处。

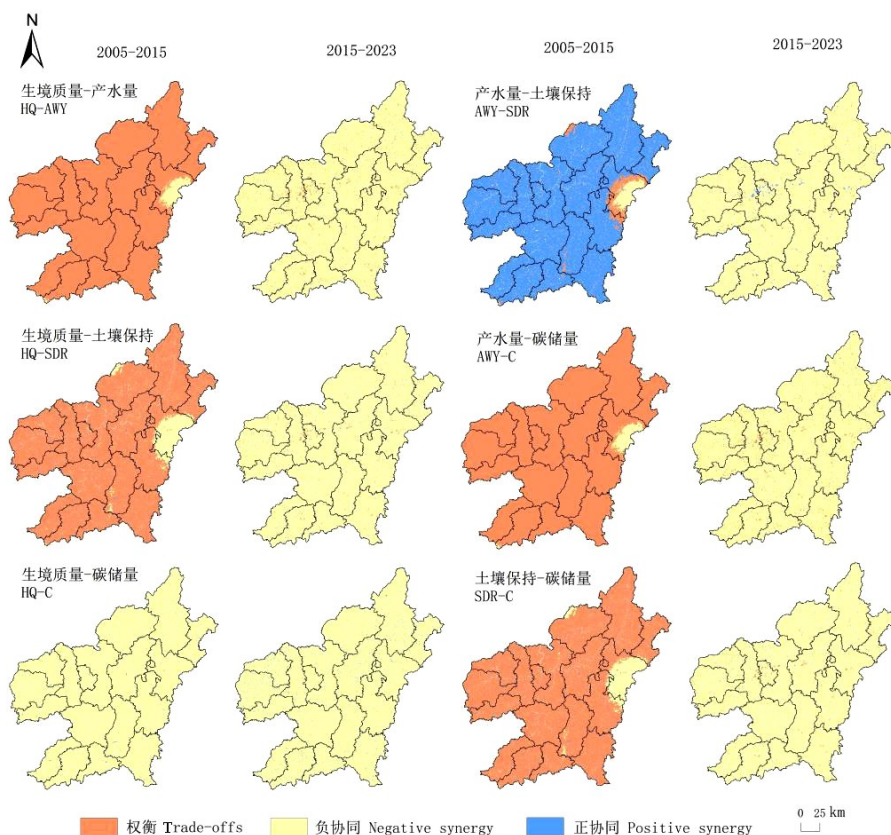


图6 2005—2023年赣州市生态系统服务权衡与协同空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecosystem service trade-offs and synergies in Ganzhou City from 2005 to 2023

3.4 土地利用对生态系统服务权衡与协同关系的影响

3.4.1 不同土地利用的生态系统服务权衡与协同

为了进一步探讨土地利用对生态系统服务及其权衡与协同关系的影响,通过统计不同土地利用生态系统服务的标准化数据均值,并用玫瑰图来反映(图7)。可以发现,随着时间的变化,同一土地利用类型的生境质量、土壤保持和碳储量均值基本没有变化,表明同一土地利用类型的生境质量、土壤保持和碳储量之间的构成是相对稳定的,土地利用数量的变化只会影响生态系统服务总量。此外,同一类土地利用类型中,产水量在不同的时间节点有波动,主要是由于产水量不仅受土地利用变化的影响,也与降水量密切相关。

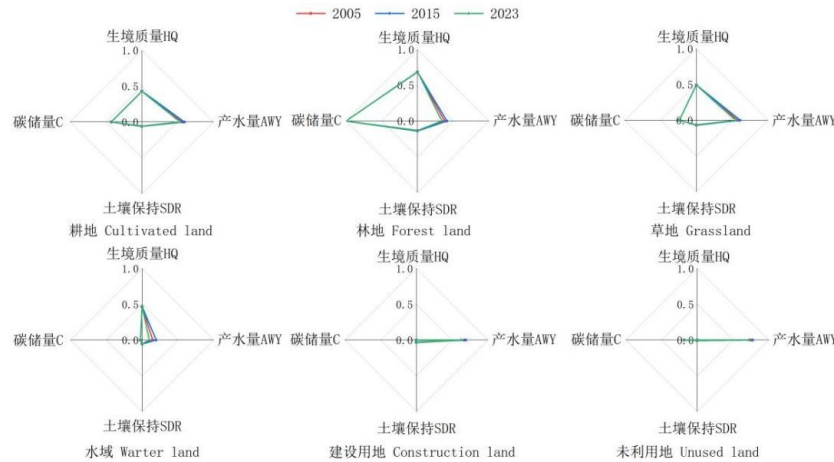


图7 2005—2023年赣州市不同土地利用的生态系统服务均值

Fig.7 Mean values of ecosystem services for different land uses in Ganzhou from 2005 to 2023

3.4.2 土地利用对生态系统服务的影响

通过比较土地利用变化区与未变化区的生态系统服务差值,来进一步量化不同土地利用变化对生态系统服务的影响程度(图8)。结果显示,土地利用变化对碳储量的影响程度大于产水量、生境质量和土壤保持。具体表现为:其他地类转为林地能增加碳储量,且增加量远大于其他地类之间的变化,林地和建设用地的相互转移对碳储量影响程度最大。水域转为其他地类能增加产水量,水域和未利用地的相互转移对产水量影响程度最大。建设用地和未利用地转出均能提高生境质量,未利用地转为林地能最大程度地提高生境质量,而林地转为建设用地则会最大程度地降低生境质量。未利用地转出能提高土壤保持,未利用地和草地的相互转换对土壤保持影响程度最大。

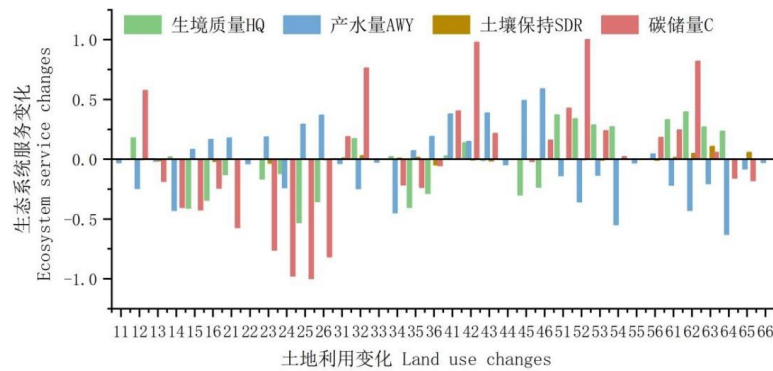


图8 土地利用变化对生态系统服务的影响

Fig.8 Impacts of land use change on ecosystem services

4 讨论与结论

4.1 讨论

赣州市土地利用变化会影响生态系统服务及其权衡与协同关系,且土地利用变化越剧烈,生态系统服务的变化也越剧烈。

不同的土地利用类型有不同的生态系统服务构成特征,土地利用的相互转移会造成土地利用空间格

局的变化,不同的土地利用空间格局对应了不同的生态系统服务空间格局。当土地利用变化时,生态系统服务也随之变化,且不同的土地利用类型之间变化造成的生态系统服务变化程度也不同。这与以往“土地利用格局决定了生态系统服务”的研究结论相似^[23-24]。比如,矿区生态修复工程会使得大量的废弃地转变为林地,森林覆盖率增加有利于碳储量的提升,结合本研究结论,转为林地对碳储量的提升影响最大。

生态系统服务变化过程中的增减关系就是生态系统服务之间的权衡与协同关系。即,土地利用变化影响生态系统服务变化,同时也影响着生态系统服务之间的关系。比如,退耕还林工程会使得耕地、建设用地向林地转移,林地的碳储量、生境质量、土壤保持能力高于耕地和建设用地,而林地的产水量低于耕地和建设用地。这会使得区域的碳储量、生境质量和土壤保持能力提高,而产水能力降低,进而表现为碳储量、生境质量和土壤保持三者之间的协同关系,产水量与三者之间的权衡关系。

基于不同土地利用变化带来的生态系统服务变化,能够为赣州市国土空间总体规划中的“三区三线”精准划定、生态补偿标准的科学核定以及土地利用结构的优化调整提供直接的科学依据和决策支持,推动区域生态安全格局构建与高质量发展。赣州市未来土地利用管理应强化“发展与保护并重”的导向。一方面要严格管控建设用地的无序扩张,推行低丘缓坡等未利用地的集约开发,盘活存量用地,减少对优质生态空间(特别是林地)的侵占。另一方面,将林地生态功能提升纳入国土空间规划体系。依据生态系统服务重要性评估结果,对林地进行分区、分类管理:在核心区域严格保护天然林和生态公益林,推进封山育林;在一般区域,鼓励发展兼具生态与经济效益的复合林经营模式,系统性增强区域生态稳定性。

本研究中也存在一些局限性,对于生态系统服务的量化标准还有待完善,受限于数据获取难度,未对相关模型参数进行精细化和本地化处理,导致数据精度不高。未来可以完善生态系统服务的指标体系,进一步对模型进行细化,提高数据精度。

4.2 结论

本研究基于2005—2023年遥感数据,采用InVEST模型计算生境质量、产水量、土壤保持和碳储量4种生态系统服务,分析了赣州市生态系统服务时空变化特征及其权衡与协同关系,并定量衡量了土地利用变化对生态系统服务及其权衡与协同关系的影响。主要结论如下:

(1)2005—2023年赣州市土地利用结构维持稳定。林地所占面积最大,超过了74%;建设用地动态度最高,达4.83%。2005—2015年,耕地面积每年减少7.57 km²,建设用地每年增加17.53 km²,林地每年转出转入面积在所有地类中最大,分别为59.68 km²和52.15 km²。2015—2023年,耕地面积每年增加34.41 km²,转入面积最大的是耕地,为135.93 km²,转出面积最大的则是林地,为140.43 km²。

(2)2005—2023年,赣州市生境质量、产水量、土壤保持和碳储量每年分别下降了0.000 2、3.170 7 mm、21.893 0 t/km²和5.154 7 t/km²。生境质量和碳储量表现为持续下降趋势,产水量和土壤保持表现为先上升后下降的趋势。不同的生态系统服务的空间分布特征存在差异性。1类、2类和3类热点区域面积最大,总面积占比90%左右。非热点区域和1~4类热点区在空间上按顺序依次分布,4类热点区集中在森林覆盖率高的区域,非热点区集中在建设用地区域。

(3)赣州市生态系统服务之间以协同关系为主,但不同时间截面和不同时间段之间存在差异。不同时间截面的生态系统服务之间的权衡与协同关系相同。如,生境质量与碳储量、生境质量与土壤保持、土壤保持与碳储量为协同关系,产水量与碳储量、生境质量与产水量为权衡关系。不同时间段的生态系统服务之间的权衡与协同关系不一定相同,如,2005—2015年生境质量与产水量、产水量与碳储量、生境质量与土壤保持、土壤保持与碳储量以权衡关系为主,到2015—2023年则以协同为主。

(4)同一土地利用类型的各种生态系统服务之间的构成维持相对稳定,但不同土地利用类型的各种生态系统服务之间的构成存在差异。2005—2023年赣州市土地利用变化对碳储量的影响程度>产水量>生境质量>土壤保持,林地和建设用地、水域和未利用地、未利用地和草地分别对碳储量、产水量、土壤保持的影响程度最大。

致谢:江西省国土空间调查规划研究院项目(JXYJY2023004)、江西省研究生创新专项资金项目(YC2022-s414)和江西省党校系统哲学社会科学项目(25ND46)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.

- OUYANG Z Y, WANG R S, ZHAO J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese journal of applied ecology, 1999(5): 635-640.
- [2] COSTANZA R, D'ARCE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological economics, 1997, 25(1): 3-15.
- [3] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDEN L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology letters, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [4] SALZMAN J, BENNETT G, CARROLL N, et al. The global status and trends of payments for ecosystem services[J]. Nature sustainability, 2018, 1(3): 136-144.
- [5] 吕大伟, 蔡海生, 张学玲, 等. 基于InVEST模型的万年县生境质量时空演变与景观格局分析[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 783-793.
- LYU D W, CAI H S, ZHANG X L, et al. Analysis of spatial and temporal evolution of habitat quality and landscape pattern in Wannian County based on InVEST model[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(3): 783-793.
- [6] 罗松开, 王建辉, 罗志军, 等. 鄱阳湖城市群生态系统服务空间网络结构特征及其优化策略[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(2): 557-568.
- LUO S K, WANG J H, LUO Z J, et al. Characteristics and optimization strategies of ecosystem service spatial network in Poyang Lake urban agglomeration[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2025, 47(2): 557-568.
- [7] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources science, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [8] 杨晓帆, 蔡海生, 张学玲, 等. 大南昌都市圈生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J]. 生态学杂志, 2024, 43(8): 2275-2284.
- YANG X F, CAI H S, ZHANG X L, et al. Spatial-temporal variations of ecosystem service value and its driving factors in the Great Nanchang Metropolitan Area[J]. Chinese journal of ecology, 2024, 43(8): 2275-2284.
- [9] 高明会, 蔡海生, 张学玲, 等. 饶河流域水源涵养服务供需演变及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 389-399.
- GAO M H, CAI H S, ZHANG X L, et al. Driving factors and evolution of supply and demand of water conservation services in Raohe River Basin[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2024, 44(2): 389-399.
- [10] 张家其, 朱莉, 阳斌成. 洞庭湖流域生态系统服务供需时空演变与情景预测[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(8): 1702-1714.
- ZHANG J Q, ZHU L, YANG B C. Temporal and spatial evolution and multi-scenario of ecosystem services supply and demand in Dongting Lake Basin[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(8): 1702-1714.
- [11] 朱丹丹, 安睿, 刘艳芳, 等. 湖北省生态系统服务协同权衡时空差异及归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(4): 799-809.
- ZHU D D, AN R, LIU Y F, et al. Analysis of spatial-temporal difference in synergistic trade-offs of ecosystem services in Hubei Province[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(4): 799-809.
- [12] 张宇, 陈宇轩, 高志鹏, 等. 基于土地利用变化的鄂尔多斯市生态系统服务价值时空演化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2025, 39(2): 131-140.
- ZHANG Y, CHEN Y X, GAO Z P, et al. Characteristics of spatio-temporal evolution of ecosystem service value in Ordos City based on land-use change[J]. Journal of arid land resources and environment, 2025, 39(2): 131-140.
- [13] 王越, 宋戈, 王盼盼. 松嫩高平原土地利用类型变化特征及时空格局研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 61-66.
- WANG Y, SONG G, WANG P P. The characteristics and spatiotemporal patterns of land use types change in Songnen high plain[J]. Journal of arid land resources and environment, 2017, 31(4): 61-66.
- [14] 赖智勇, 廖富强, 舒晓波, 等. 赣江流域生境质量时空格局演化及预测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(10): 2236-2250.
- LAI Z Y, LIAO F Q, SHU X B, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in Ganjiang River Basin[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(10): 2236-2250.
- [15] 尚俊, 蔡海生, 龙月, 等. 基于InVEST模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1901-1915.
- SHANG J, CAI H S, LONG Y, et al. Temporal-spatial distribution and transition of habitat quality in Poyang Lake Region based on InVEST model[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1901-1915.
- [16] 李莹莹, 马晓双, 祁国华, 等. 基于参数本地化InVEST模型的安徽省水源涵养功能研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 313-325.

- LI Y Y, MA X S, QI G H, et al. Studies on water retention function of Anhui Province based on InVEST model of parameter localization[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 313-325.
- [17] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4461-4472.
- FENG Q, ZHAO W W. The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review[J]. Acta ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [18] 许联芳, 张海波, 张明阳, 等. 南方丘陵山地带土壤保持功能及其经济价值时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9): 1599-1605.
- XU L F, ZHANG H B, ZHANG M Y, et al. Spatial-temporal variation characteristics of the soil conservation function and its economic value in the southern hilly and mountain area, China[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(9): 1599-1605.
- [19] 朱青, 国佳欣, 郭熙, 等. 基于随机森林算法的土壤侵蚀影响因子研究: 以赣江上游流域为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 59-68.
- ZHU Q, GUO J X, GUO X, et al. Research on influencing factors of soil erosion based on random forest algorithm: a case study in Upper Reaches of Ganjiang River Basin[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2020, 40(2): 59-68.
- [20] 罗诚康, 杜思敏, 郑博福, 等. 赣南地区土壤保持功能的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 57-65.
- LUO C K, DU S M, ZHENG B F, et al. Temporal and spatial change characteristics of soil conservation function in Southern Jiangxi Province[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2022, 42(3): 57-65.
- [21] NEWELL R G, STAVINS R N. Climate change and forest sinks: factors affecting the costs of carbon sequestration[J]. Journal of environmental economics and management, 2000, 40(3): 211-235.
- [22] 王宇滨, 曹良中, 王妍, 等. 土地利用/土地覆被对江西陆地碳储量的影响[J]. 遥感信息, 2023, 38(4): 96-105.
- WANG Y B, CAO L Z, WANG Y, et al. Impact of land use/land cover on terrestrial carbon storage in Jiangxi[J]. Remote sensing information, 2023, 38(4): 96-105.
- [23] 方露露, 许德华, 王伦澈, 等. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J]. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.
- FANG L L, XU D H, WANG L C, et al. The study of ecosystem services and the comparison of trade-off and synergy in Yangtze River Basin and Yellow River Basin[J]. Geographical research, 2021, 40(3): 821-838.
- [24] 牛雨楠, 邵全琴, 陈美祺, 等. 2000—2020年长江流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J]. 资源科学, 2024, 46(5): 853-866.
- NIU L N, SHAO Q Q, CHEN M Q, et al. Changes in ecosystem services and their tradeoffs and synergies in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. Resources science, 2024, 46(5): 853-866.

(责任编辑:熊淑琪)



第一作者简介:余漫, 助理研究员, 在读博士研究生。2012—2016年在中国矿业大学读土地资源管理专业本科, 获得工学学士学位。2016—2019年在中国矿业大学攻读土地资源管理专业硕士研究生, 获得管理学硕士学位。2023年9月进入江西农业大学攻读农业资源与环境博士学位。2020年9月进入中共江西省委党校工作, 现为中共江西省委党校江西经济社会发展战略研究所助理研究员。在校期间获得过优秀创新硕士奖学金、一等奖学金、单项奖学金。在土地生态、农业经济领域发表学术论文6篇, 参与各类国家、省市级项目10余项。



通信作者简介:蔡海生, 教授、博士生导师, 宜春学院党委副书记、院长, 博士。江西省百千万人才工程人选, 江西省高校中青年学科带头人, 中国农业工程学会土地利用工程专业委员会副主任委员, 全国普通高校毕业生就业指导委员会委员, 江西省级教师教学创新团队带头人, 江西省自然资源利用科技与管理创新研究基地、南昌市鄱阳湖生态重点实验室、江西农业大学富硒农业产业发展研究中心负责人。主持完成国家级科研项目4项、省部级科研项目50多项, 发表学术论文160多篇, 出版专著2部、编著3部、译著1部, 获发明专利2项、实用新型专利4项、标准3项。获国土资源科学技术奖二等奖、江西省科学技术进步奖一等奖、江西省教育教学优秀成果二等奖各1项, 江西高校人文社会科学研究优秀成果二等奖1项、三等奖2项, 江西省高校教学成果奖一等奖6项、二等奖3项。