

DOI: 10.5846/stxb202104221062

高伟, 李欣悦, 张远, 陈岩. 长江流域生态系统服务价值时空演变与预测. 生态学报, 2023, 43(15): 6203–6211.

Gao W, Li X Y, Zhang Y, Chen Y. Evolution and prediction of ecosystem service values of the Yangtze River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6203–6211.

长江流域生态系统服务价值时空演变与预测

高 伟¹, 李欣悦², 张 远¹, 陈 岩^{3,*}

1 广东工业大学环境生态工程研究院, 大湾区城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室, 广州 510006

2 云南大学生态与环境学院, 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091

3 生态环境部环境规划院, 国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012

摘要: 长江流域是我国的经济重心和生态保育区, 揭示其生态系统服务价值(ESV)的历史演变和发展趋势对支撑长江流域的生态经济系统持续发展具有重要意义。采用长江流域 1992—2018 年逐年土地利用数据, 构建了基于修正系数的 ESV 评估模型和 FLUS-Markov 土地利用预测模型, 解析了全流域 ESV 的历史演变特征和未来 2030 年变化趋势。结果表明: (1) 2018 年长江流域的 ESV 总量 11.68×10^{12} 元, 1992—2018 年 ESV 呈上升趋势, 年均提高 297.00×10^8 元; (2) 供给服务价值是流域 ESV 的最大贡献源, 占总量的 48.3%—51.8%, 文化服务价值是增长最快的贡献源, 1992—2018 年增长了 52.5%; (3) 上游地区是长江流域 ESV 最集中的区域, 上游 ESV 占全流域的 45.15—46.8%, 从 1992 年到 2018 年, 长江流域 ESV 重心有向下游流动的趋势; (4) 2030 年长江流域的建设用地将进一步扩展, 同时耕地、草地面积有下降的风险, 2030 年长江流域的 ESV 新增量达到 0.36×10^{12} 元, 主要来自娱乐和气候调节服务价值的提升; (5) 开展逐年尺度的 ESV 演变分析可有效降低变化趋势判断的不确定性, 有利于获得精细、可靠的趋势判别结果。

关键词: 生态系统服务价值; 土地利用; FLUS 模型; 马尔科夫链; 长江流域

Evolution and prediction of ecosystem service values of the Yangtze River Basin

GAO Wei¹, LI Xinyue², ZHANG Yuan¹, CHEN Yan^{3,*}

1 Key Laboratory for City Cluster Environmental Safety and Green Development of the Ministry of Education, Institute of Environmental and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2 College of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming 650091, China

3 State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

Abstract: The Yangtze River Basin is China's economic center and ecological conservation area. Revealing its ecosystem service value's historical evolution and development trend is of great significance to maintain the sustainable development of the Yangtze River Basin's eco-economic system. Based on the annual land use data of the Yangtze River Basin from 1992 to 2018, the evaluation model of ecosystem service value (ESV) based on the revised coefficient and the land use prediction model of FLUS-Markov were constructed to analyze the spatial and temporal evolution characteristics of ESV in the Basin from 1992 to 2018 and 2030. The results showed that the total ESV in the Yangtze River Basin was 11.68 trillion yuan in 2018 and presented an upward trend from 1992 to 2018, with an average annual increase of 29.7 billion yuan. The value of supply services was the largest contributing source of the Basin's ESV, accounting for 48.3%—51.8% of the total. The value of cultural services was the fastest-growing contribution source, with an increase of 52.5% from 1992 to 2018. The

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201004); 珠江人才计划引进创新创业团队项目(2019ZT08L213)

收稿日期: 2021-04-22; **采用日期:** 2023-01-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ychenychen@163.com

upstream region contributed the largest ESV in the Yangtze River Basin, accounting for 45.1%—46.8% and the hotspots of ESV in the Yangtze River Basin tended to move to downstream. In 2030, the construction land in the Yangtze River Basin will be further expanded, and the arable land and grassland areas will have a risk of decline. In 2030, the new increment of ESV in the Yangtze River Basin will reach 356.32 billion yuan, mainly from the enhancement of entertainment and climate regulation service value. The evaluation of ESV based on the year-on-year scale is helpful to obtain accurate and reliable results for temporal trend identification.

Key Words: ecosystem service value; land use; FLUS model; Markov chain; Yangtze River Basin

长江流域是我国重要的经济增长和生态保护区,其生态系统服务的变化和发展趋势对我国生态经济可持续发展具有重要意义。随着长江流域城市化进程的不断推进,流域建设用地不断扩张,土地利用结构发生了显著变化^[1],影响了流域生态系统结构和功能^[2-3]。生态系统服务是指通过生态系统的结构、功能和过程所间接地提供生命支持和服务^[4],也可认为是生态系统与生态过程所赖以生存的自然环境与效用^[5],前者涵盖的对象更加广泛,包含自然环境和社会环境,而后者主要侧重于服务自然环境本身。Costanza 等认为生态系统服务价值(ecosystem service values,ESV)是以货币形式评估生态系统提供维持人类赖以生存的环境和商品服务能力,并且最先在全球范围内对 ESV 进行定量估算^[4],成为全球生态系统服务价值评估研究的重要里程碑。生态系统服务的货币化是衡量生态系统对经济社会发展支撑能力的有效方法,定量评估 ESV 历史变化并预测未来趋势已经成为生态系统服务研究的基础。目前,ESV 的估算方法主要有基于单位服务功能价格的方法和基于单位面积价值当量因子的方法两种。功能价格法即基于生态系统服务功能量和功能量的单位价格得到总价格^[6]。当量因子法是在不同生态系统服务功能类型的基础上,构建各类生态系统各种服务的价值当量,结合各生态系统的分布面积进行计算^[4]。相对于功能价格法,当量因子法的数据要求与计算过程更为简便,是目前 ESV 计算的主流方法。同时,谢高地等根据中国实际情况修正了计算系数,建立了“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”,广泛应用于多个研究中^[7]。此外,考虑当量因子的区域差异,相关研究对当量因子进行了修正,如净初级生产力修正^[8]、CPI 指数修正^[9]和粮食产量净利润修正^[10]等。

ESV 的变化主要受土地利用变化的影响^[11],要对 ESV 进行有效预测,则需要对土地利用变化进行准确的模拟预测^[10]。土地利用变化模拟预测主要的模型包括灰色预测模型(GM)^[12]、系统动力学模型^[13]、CLUE-S 模型^[14]、CA-Markov 模型^[15]和 FLUS 模型^[13]等。灰色预测模型的优点是需要的数据较少,计算便捷且精度较高^[16],但灰色预测模型需要时间序列数据,且无法得到土地利用的空间分布信息。系统动力学一般利用流图、因果关系图和结构框架图来建立模型,模拟政策驱动力对土地利用变化的影响^[17]。但是,以上两种模型无法体现空间分布特征,而 CLUE-S 和元胞自动机(CA)模型则能够模拟土地利用分布格局,具有良好空间拓展性,但由于 CA 模型转换规则构建难度大且变化数量无法精确模拟,所以常常与 Markov 链耦合^[18]。FLUS 模型出现较晚,在对传统的 CA 模型进行改进的基础上,引入了自适应惯性系数和轮盘竞争机制,其模拟精度高于 CA 等模型^[19]。该模型不但能同时模拟多种土地利用类型的变化,而且能反映真实土地利用变化中的不确定性以及能模拟跳跃式土地利用变化情形^[20],被广泛应用于土地利用模拟预测研究中^[13,19-20]。近年来,生态系统服务价值驱动因素方面的研究逐渐深入,除了自然因素外,人文因素的影响逐渐被重视,徐媛银等分析人均 GDP、人口密度和城市化率等 10 个人文因素对赣南地区 ESV 的驱动影响,得出社会经济因素与 ESV 变化率在空间分布上具有极显著的相关性^[21]。此外,ESV 研究也扩展到区域生态安全领域,李俊翰和高明秀分析了 ESV 和生态风险指数的变化特征和时空关联性^[22]。然而,当前 ESV 研究多是针对单一或离散几期的土地利用,在识别 ESV 变化趋势上存在较大的不确定性,难以获得 ESV 时间变化的精细特征。

基于 1992—2018 年共 27 年的逐年土地利用数据,构建修正系数的当量因子法,分析长江流域生态系统服务价值在年度尺度上的时空变化特征,识别流域 ESV 的精细演变轨迹;结合土地利用变化驱动特征,选择 FLUS 模型和 Markov 模型进行对流域 2030 年土地利用变化进行模拟预测分析,得到长江流域生态系统服务

价值的变化趋势,研究结果以期对长江流域的生态经济可持续发展提供决策支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江是我国最长的河流,干流全长 6393 km,流域面积 178 万 km²。流域范围涉及 17 个省级行政单元,共 134 个地级单元(图 1)。80% 的流域面积集中在四川省、湖南省、湖北省等 7 个地区。2018 年常住人口 4.61 亿,占全国 32%。地区生产总值为 32.37 万亿元(当年价),占全国总量的 35%,三次产业结构为 7:44:49。人均 GDP 达到 7.0 万元/人,高于同期全国平均水平,是我国经济增长的核心区域之一。长江作为我国水量最丰沛的河流,具有丰富的水产、林木、矿产资源和生物多样性资源,发挥着极其重要的生态系统服务功能。随着经济社会的持续发展,流域城市化水平不断提高,土地利用发生了显著变化^[1],对多种生态系统服务造成了影响^[2]。

1.2 基于修正因子的生态系统服务价值计算模型

在目前主要的两种生态系统服务价值估算方法中,基于单位面积价值当量因子的方法因计算便捷而被广泛使用,考虑通用性,本研究采用该方法计算长江流域生态系统服务价值,其计算公式如下:

$$ESV = \sum_k^n A_k \times VC_k \quad (1)$$

$$VC_k = \sum_f^m VC_{fk} \quad (2)$$

$$VC_{fk} = \frac{YNPP_k}{GNPP_k} \times ER \times PRC \times ZVC_{fk} \quad (3)$$

式中,ESV 为生态系统服务价值(元); A_k 为第 k 类土地利用类型面积(hm²); VC_k 为第 k 类土地利用类型的生态服务价值系数(元/hm²); n 为土地利用类型的总量; VC_{fk} 为第 k 类土地利用类型的第 f 项服务功能价值系数(元/hm²); m 为某土地利用的生态系统服务功能类型的总量;YNPP 和 GNPP 分别为长江流域和全球平均 NPP(g C/hm²);ER 为 2007 年人民币对美元汇率,为 7.604,来源于中国统计年鉴 2019;PRC 为 2007—2018 年的可比价格折算系数,根据中国居民消费价格指数计算,数据来源于中国统计年鉴 2019; ZVC_{fk} 为第 k 类土地利用类型的第 f 项服务功能价值系数(元/hm²),本文引用的是 Costanza 等 2014 年更新的全球生态系统服务价值系数表^[23],并结合中国货币汇率和居民消费价格指数将该表的系数折算为 2018 年中国的可比价格。由于该表是在全球的平均状态下得到的,而生态系统的服务功能与其所处的地理位置、生物多样性和自然环境相关^[8],具有明显的空间异质性。为了使生态系统服务价值系数能有效地衡量研究区域的生态系统服务价值,本文采用净初级生产力对单位面积 ESV 进行修正,长江流域和全球的净初级生产力数据来源于文献^[24—25],最终得到适用于长江流域的生态系统服务价值系数表(表 1)。

1.3 基于 FLUS-Markov 的土地利用预测模型

FLUS 模型是在传统元胞自动机模型(CA)的基础上进行改进,整合了人工神经网络算法和轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,是一种用于模拟人类活动与自然影响下的土地利用变化以及未来土地利用情景的模型。FLUS 模型采用神经网络算法结合基准期土地利用数据与多种驱动因子计算得到各种土地利用类型在研究范围内的适宜性概率。在此过程中,FLUS 模型的采样方式减少了误差传递,具有较高的准确性。其次,基于自适应惯性机制包括了邻域影响因子、惯性系数和转换成本^[26],与适宜性概率结合得到元胞转换的总体概率。最后,利用轮盘赌确定元胞是否发生用地类型的转换,从而实现土地利用变化的模拟^[20]。FLUS 模型能

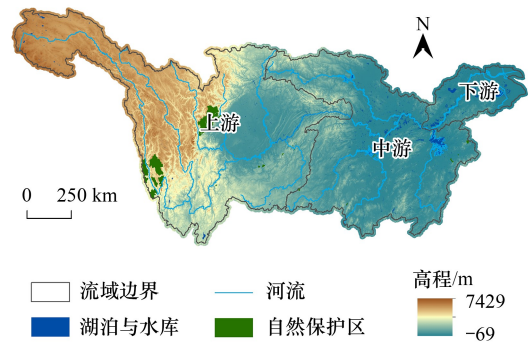


图 1 长江流域主要地理区域

Fig.1 Areas of interest in the Yangtze River basin

反映实际土地利用变化中的不确定性和复杂性,具有较高的模拟精度。

表 1 长江流域土地利用类型的生态系统服务价值系数/(元/hm²)
Table 1 Ecosystem service value coefficient of land use types in the Yangtze River Basin

类型 Type	生态系统服务功能 Ecosystem service function	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grass	水域 Waters	建设用地 Building	其他 Others
调节服务 Regulating	空气调节	0	42	63	0	0	0
	气候调节	6827	8425	277	2225	47643	0
	干扰调节	0	231	0	13615	0	0
	水调节	0	30	24	59823	861	0
	侵蚀控制	1775	1181	305	11887	0	0
	废物处理	6596	1424	519	17932	0	0
	授粉	362	105	239	0	0	0
	生物防治	544	2002	216	4323	0	0
支撑服务 Supporting	生境	0	7340	8404	11194	0	0
	土壤形成	8839	164	11	0	0	0
	养分循环	0	788	0	7811	0	0
供给服务 Provisioning	水供给	6648	1691	415	10104	0	0
	食物来源	38612	3199	8251	3283	0	0
	原材料	3643	1807	374	2458	0	0
	遗传资源	17316	5310	8404	451	0	0
文化服务 Cultural	娱乐	1365	11300	180	19957	302277	0
	文化	0	16	1156	9083	0	0
	合计	92527	45053	28838	174144	350782	0

基于神经网络的适宜性概率模块根据用户输入的自然、经济和交通区位方面的驱动因子数据,整合计算得到研究区域内每种土地利用类型在每个像元上的出现概率。具体的适宜性概率计算公式见文献^[27]。自适应惯性竞争机制的核心为自适应惯性系数,它是由当前各种土地利用类型的实际数量与土地利用需求之间的差异决定的,再在迭代中不断调整^[19],自适应惯性系数计算见文献^[20]。

元胞自动机模块需要用户预设各土地利用类型变化数量的目标,该目标会在一定程度上影响模拟结果^[27]。本文采用马尔科夫链(Markov Chain)预测土地利用变化数量,计算公式如下:

$$S_{i+1} = P_{ij} \times S_i \tag{4}$$

式中, S_t 和 S_{t+1} 分别表示 t 时刻和 $t+1$ 时刻土地的状态; P_{ij} 表示在 t 时刻用地类型发生转变的概率。本研究以 2006 年和 2018 年为两个预测基准期,预测 2030 年长江流域 7 类土地利用的数量。

1.4 数据来源

本研究所采用的数据包括土地利用历史数据和土地利用预测数据等两类。其中土地利用历史数据为 1992—2018 年逐年土地利用矢量数据,空间分辨率为 300m,数据来源于欧洲航天局(<https://www.esa-landcover-cci.org/?q=node/164>),该数据源将土地利用分为 22 类,总体精度达到 75.4%,在耕地、林地和建设用地等亚类中的用户精度超过 80%。为便于分析比较,本研究参照中国科学院资源环境数据中心土地利用分类系统,将其重分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地和冰川等 7 种类型。土地利用预测数据主要包括土地利用变化驱动力数据和限制区域数据。考虑数据可得性和土地利用变化的一般驱动因子^[21, 28—29],本文选取了自然、经济、交通区位方面的 9 项驱动因子(图 2)。其中 DEM 高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),坡度和各类距离数据是采用 ArcGIS 空间计算获得。人口、经济和行政单元矢量数据来自于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)。此外,一些特定用途的土地类型如国家公园一般不发生土地利用转化,本研究选取自然保护区、湖泊与水库等为限制转化区域(图 1),

数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>) 和 IUCN (<https://www.iucn.org/>) 等。

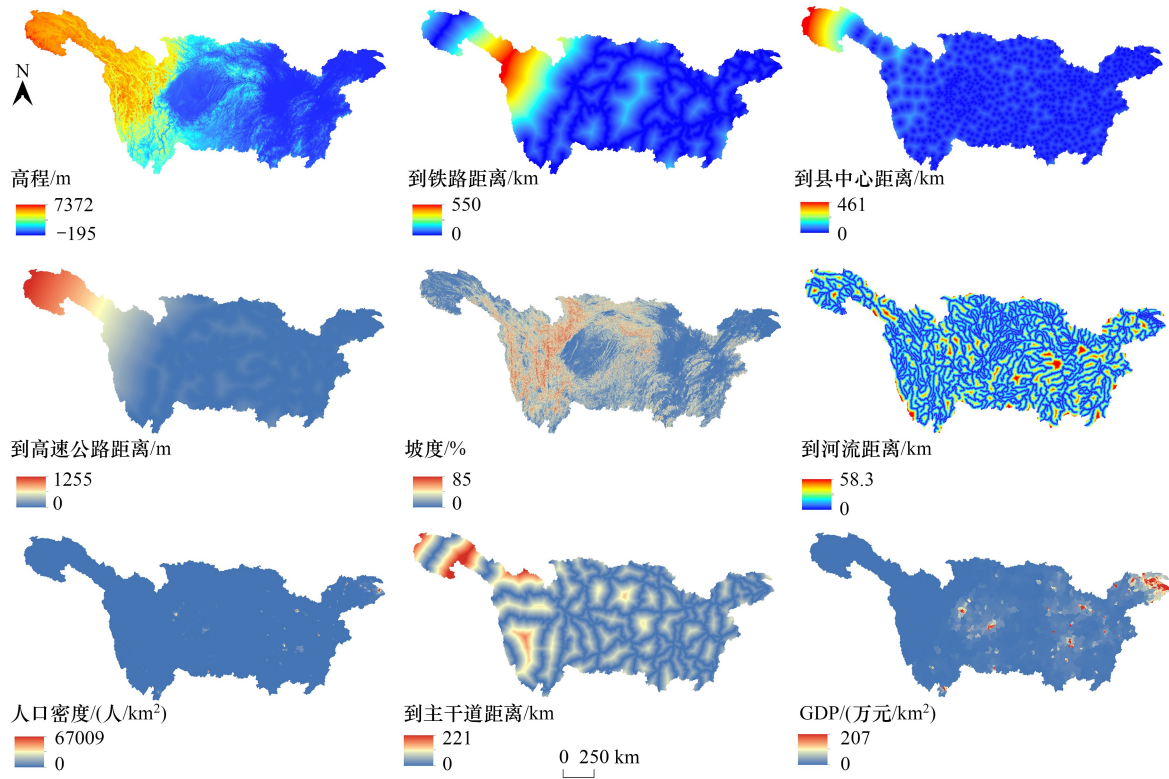


图 2 土地利用变化的驱动因子

Fig.2 Driving factors of land use change

2 结果与讨论

2.1 1992—2018 年 ESV 时空演变特征

长江流域 1992—2018 年逐年 ESV 呈现上升趋势(图 3),从 1992 的 10.95 万亿元,增长到 2018 年的

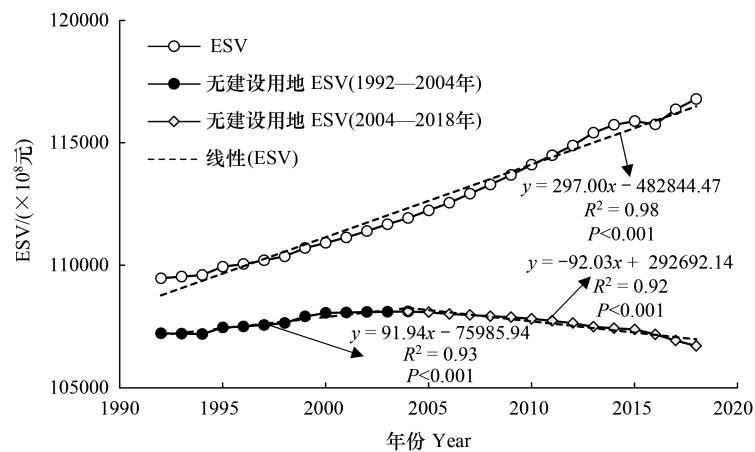


图 3 长江流域 1992—2018 年 ESV 变化

Fig.3 Alterations of ESV in the Yangtze River Basin from 1992 to 2018

11.68 万亿元,年均增长 297 亿元,占多年平均 ESV 的 2.6‰。2018 年 ESV 占流域国内生产总值的 36.1%。值得注意的是,建设用地的服务价值对长江流域 ESV 核算有显著影响。如果不考虑建设用地,1992—2018 年的 ESV 总量和变化趋势均发生改变。总量上,ESV 将下降 2.1%—8.6%。在变化趋势上,流域的 ESV 将表现为以 2004 年为转折点的先上升后下降的阶段变化特征(图 3),前阶段年均增长 91.94 亿元,后阶段则转变为年均下降 92.03 亿元。随着城市生态系统服务研究的深入,城市绿地提供的娱乐服务功能得到重视并被量化为当量因子^[14,23],因此,有必要在长江流域 ESV 评估中考虑建设用地的生态系统服务价值。

从生态系统服务类型看,长江流域的生态系统服务价值以供给服务为主,供给服务价值占总量的 48.3%—51.8%,平均 50.8%;其次是调节服务,占比 22.0%—22.5%,平均 22.3%。支撑服务和文化服务分别占比 13.0%—14.1%和 11.6%—16.6%(图 4)。从时间变化看,各服务分项价值在总量上有所波动,相对于 1992 年,2018 年支撑服务、供给服务、调节服务和文化服务价值分别变化-1.3%、-0.4%、4.3%和 52.5%,文化服务价值提升是拉动长江流域 ESV 升高的主要驱动力。

从 ESV 的空间分布看,长江流域的 ESV 主要集中于上游,上游的 ESV 为 5.12—5.27 万亿元,占比 45.1%—46.8%,中游的 ESV 为 4.71—5.02 万亿元,占比 43.0%—43.1%,下游 ESV 为 1.12—1.39 万亿元,占比 10.2%—11.9%(图 5)。从 1992 年到 2018 年,长江上、中、下游地区的 ESV 总量均处于上升趋势,但上升的幅度和成分变化存在差异,下游上升幅度最大,为 23.9%,其次是中游为 6.6%,下游上升 3.0%。文化服务和调节服务在上、中、下游地区均有不同程度的上升,但支撑服务全面下降,供给服务仅在中游地区上升。总体来看,充分发挥城市生态系统的服务价值在提升长江流域 ESV 中发挥越来越重要的作用。

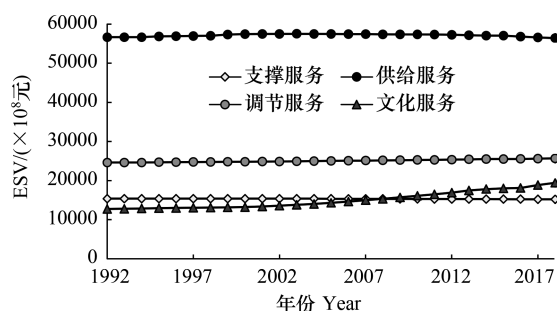


图 4 长江流域 1992—2018 年单项 ESV 变化

Fig.4 Single ESVs in the Yangtze River Basin from 1992 to 2018

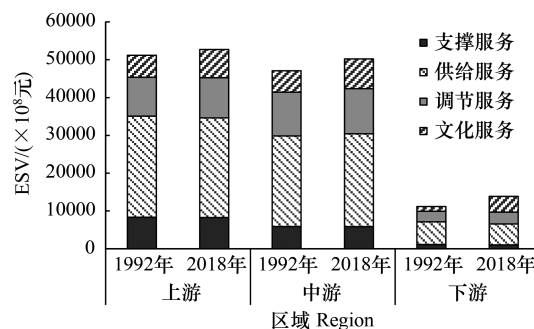


图 5 长江流域不同区域 1992—2018 年 ESV 变化

Fig.5 ESV of sub-basins in the Yangtze River Basin in 1992 and 2018

2.2 2030 年 ESV 预测

本研究利用 GeoSOS-FLUS 软件进行运算模拟得到 2030 年长江流域各土地利用类型的预测结果(图 6)。通过对比 2018 年与 2030 年的各土地利用类型面积变化,发现流域未来的土地利用变化主要体现在耕地下降(减少 10493 km²)和建设用地升高(上升 12919 km²),这将延续当前的土地利用变化趋势。为了验证 FLUS 模型模拟结果的精确性,本研究选取 2006 年土地利用作为基准期预测 2018 年的土地利用情景,将模拟结果与 2018 年实际的土地利用情景对比,结果表明显示总体精度为 0.85, Kappa 系数为 0.78,达到较好的模拟精度和一致性^[27]。

利用相同的生态系统服务价值计算方法,结合 FLUS 模型模拟的土地利用情景结果,得到长江流域

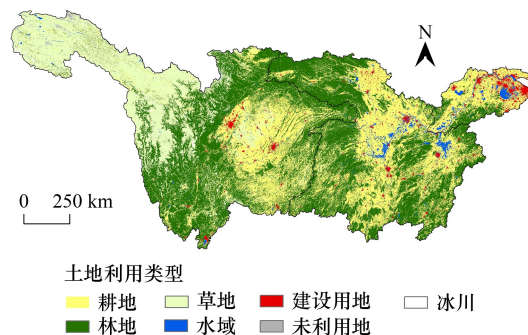


图 6 长江流域 2030 年土地利用预测结果

Fig.6 Predicted land use of the Yangtze River Basin in 2030

2030 年 ESV,并将其与 2018 年 ESV 进行对比(表 2)。相对于 2018 年,2030 年长江流域的 ESV 上升 3563.2 亿元,上升率为 3.1%。从各土地利用类型来看,耕地、林地和草地 ESV 呈下降趋势,耕地最为明显,下降率为 1.7%,ESV 将减少 970.9 亿元;其次是草地,下降 87.3 亿元,下降率为 0.9%,林地 ESV 下降的总量和变化率分别为 26.3 亿元和 0.1%。实现 ESV 增长的土地类型是建设用地和水域,增长量分别达到 4531.7 和 116.1 亿元,增长率分别为 44.9%和 1.9%。长江流域 2030 年各土地利用类型 ESV 的变化与土地利用结构变化高度重合,可以认为城市化进程推动土地利用向具有更高生态系统服务价值的建设用地转化,最终导致总体 ESV 的升高。

表 2 长江流域 2018 年和 2030 年不同土地利用类型 ESV

Table 2 ESV of different land use types in the Yangtze River Basin in 2018 and 2030

土地利用类型 Land use type	2018	2030	2018—2030		
	ESV/ $\times 10^9$ 元	ESV/ $\times 10^9$ 元	变化量 Change amount/ $\times 10^9$ 元	趋势 Trend	变化率 Rate of change/%
耕地 Cropland	5711.49	5614.39	-97.09	↓	-1.7
林地 Forest	3361.88	3359.25	-2.63	↓	-0.1
草地 Grass	1001.11	992.38	-8.73	↓	-0.9
水域 Waters	596.50	608.11	11.61	↑	1.9
建设用地 Building land	1008.65	1461.82	453.17	↑	44.9
未利用地 Unused land	0	0	0	不变	0
冰川 Glacier	0	0	0	不变	0
总计 Total	11679.62	12035.95	356.32	↑	3.1

2.3 时间尺度对 ESV 演变趋势判别的影响

由于土地利用解释的成本较高,难以获得逐年的土地利用数据,因此当前的 ESV 时间演变研究多采用一定时间间隔的 2—5 期土地利用数据^[10,16,22]。本研究表明 ESV 计算结果呈现出年际波动性特点(图 3),因此土地利用数据的采样时间间隔和样本量可能影响 ESV 演变趋势的判断。为评估采样间隔和样本量对 ESV 趋势判别的影响,本研究检验了基于不同时间尺度的 ESV 线性变化趋势(图 7)。随着采样间隔的扩大,样本量急剧下降,线性趋势的斜率和不确定性范围有扩大趋势,区间极差由 1a 的 32.4 上升到 6a 的 135.2。与此同时,线性拟合函数的 R^2 有下降趋势,从 1a 的 0.99 下降到 6a 的 0.98,标准误差则呈现上升趋势,从 318 上升到 403,表明样本量下降时拟合优度下降,误差上升。因此,小样本可能导致趋势变化量的低估和不确定性范围

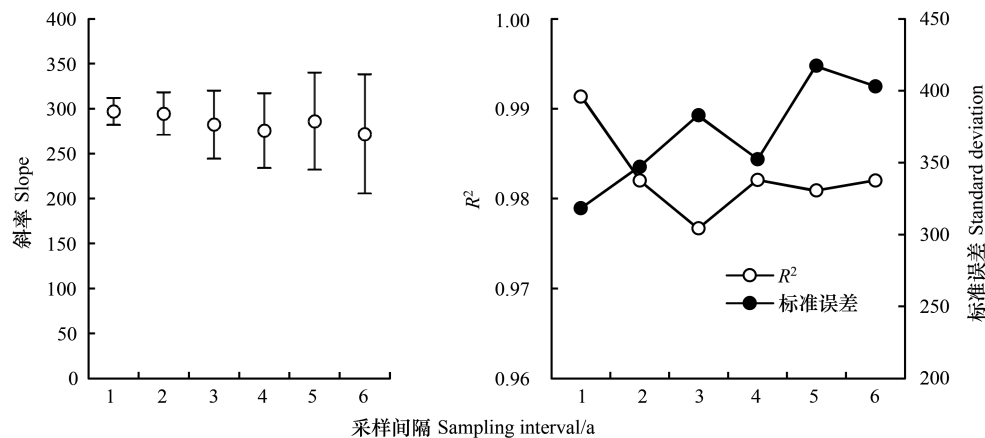


图 7 不同采样间隔的 ESV 时间演变线性趋势斜率及其不确定范围

Fig.7 Linear slope and its uncertain scope of ESV across different sampling intervals

扩大。总体来看,基于逐年尺度的 ESV 估计能够获得更加精细、可靠的趋势判别结果。

2.4 不确定性分析

基于当量因子法计算生态系统服务价值主要包括土地利用面积和当量因子两个参数,因此这两个参数的不确定性决定了 ESV 计算结果的可靠性。土地利用数据一般来自于两个途径:用户使用卫星遥感影像自行解译和土地利用解译产品。其中,土地利用解译产品由专业部门解译并进行质量控制,具有较好的通用性,但不同解译产品之间仍可能存在差异。为评估解译产品之间的差异性,本研究与资源环境科学与数据中心的土地利用产品进行了对比(图 8)。结果表明,两个数据源的土地利用在结构上具有一定的相似性,均以林地为主,其次是耕地、草地、水域和建设用地。但是耕地、草地与建设用地的面积存在较大差异,特别是耕地和草地。本研究的耕地解译结果显著高于对比结果 22%,而草地则低于对比结果 18%。进一步分析发现,造成这种差异的主要原因可能是两个数据的土地分类存在差异,本研究采用的数据源的存在一部分类别交叉情况,例如代码 30 类别中是以耕地为主(占比>50%),同时含有一定覆盖度的草地。本研究的耕地面积可能存在高估,而草地的面积可能存在低估。由于耕地单位面积生态系统服务价值高于草地,因此可能导致总体 ESV 偏高。单位面积的生态系统服务价值系数(简称当量因子)是 ESV 计算的另一重要不确定性来源。当前当量因子主要采用 Costanza^[4,23] 和谢高地等^[7] 的计算结果及其各种修正形式^[8-10,30]。由于计算依据存在差异,不同研究之间的当量因子取值缺乏可比性和参考性,造成了 ESV 计算结果存在较大的不确定性。此外,本研究未考虑未利用地的 ESV,一般默认为可忽略或取较低的数值^[14],由于研究期间的未利用地面积占比 0.18%—0.25%,对结果影响有限。

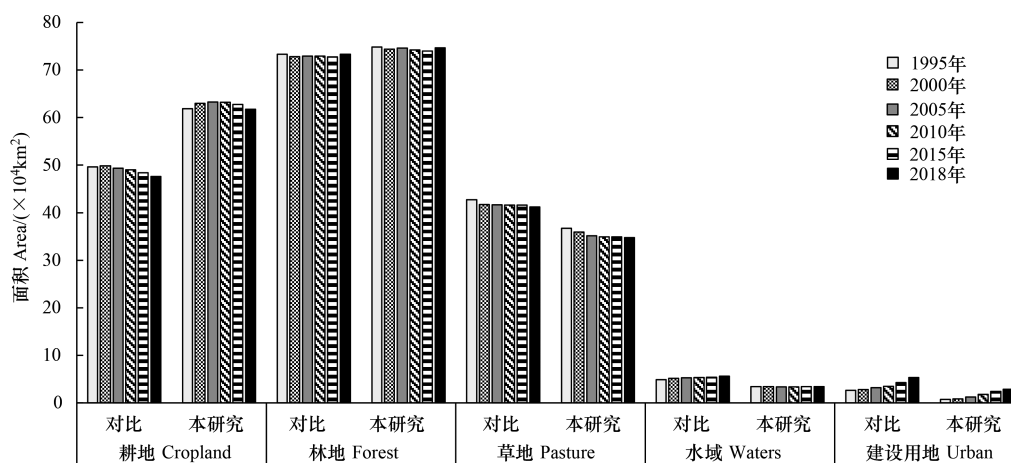


图 8 不同来源长江流域土地利用面积比较

Fig.8 Land use area of the Yangtze River Basin in selected years from different sources

3 结论

本研究根据逐年尺度的土地利用数据,构建了修正生态系统服务价值计算模型和 FLUS 模型,分析了长江流域 ESV 的历史演变特征与未来趋势,得到主要结论如下:

(1) 1992—2018 年长江流域 ESV 总体呈上升趋势,年均提高 297 亿元。供给服务价值是流域 ESV 的最大贡献源,占总量的 48.3%—51.8%,其次是调节服务、支撑服务和文化服务。其中,文化服务价值增长了 52.5%,是实现长江流域 ESV 升高的主要驱动力。建设用地的正向服务价值是影响长江流域 ESV 计算结果和趋势的关键因素,提高城市生态系统的服务价值对提升长江流域 ESV 具有越来越重要的作用。

(2) 上游地区是长江流域的 ESV 最集中的区域,上游 ESV 占全流域的 45.1%—46.8%,中游和下游地区依次递减。从 1992 年到 2018 年,长江上、中、下游地区的 ESV 总量均处于上升趋势,从上游到下游 ESV 上升

幅度依次上升,长江流域 ESV 重心有向下游流动的趋势。

(3) 2030 年长江流域的建设用地将进一步扩展,同时耕地、草地面积有下降的风险。建设用地的增长将提升娱乐和气候调节服务价值的提升,导致长江流域 2030 年 ESV 呈上升趋势,2030 年长江流域的 ESV 新增量为 3563.2 亿元。

(4) 开展逐年尺度的生态系统服务价值演变分析可有效降低变化趋势判断的不确定性。随着采样间隔的扩大和样本量的下降,土地利用变化的线性斜率和不确定性范围均有扩大趋势,造成拟合优度下降和误差上升。基于逐年尺度的 ESV 核算有利于获得精细、可靠的趋势判别结果。

参考文献 (References):

- [1] 李威, 陈杰, 李璐, 陈华. 1980—2015 年长江流域土地利用变化分析. 人民长江, 2020, 51(2): 49-57.
- [2] 程建, 程久苗, 吴九兴, 徐玉婷. 2000—2010 年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 894-901.
- [3] 孔令桥, 张路, 郑华, 徐卫华, 肖赓, 欧阳志云. 长江流域生态系统格局演变及驱动力. 生态学报, 2018, 38(3): 741-749.
- [4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] 高婧, 李晋昌, 杨永刚. 汾河源区生态系统服务价值的时空变化. 中国沙漠, 2015, 35(3): 814-820.
- [6] 高伟, 杜展鹏, 严长安, 陈岩. 污染湖泊生态系统服务净价值评估——以滇池为例. 生态学报, 2019, 39(5): 1748-1757.
- [7] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [8] 陈阳, 张建军, 杜国明, 付梅臣, 刘凌露. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变. 生态学报, 2015, 35(18): 6157-6164.
- [9] 王航, 秦奋, 朱筠, 张传才. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2017, 37(4): 1286-1296.
- [10] 王金凤, 刘方, 白晓永, 代稳, 李琴, 吴路华. 西南地区生态系统服务价值时空演变及模拟预测. 生态学报, 2019, 39(19): 7057-7066.
- [11] Gomes E, Inácio M, Bogdzewicz K, Kalinauskas M, Karnauskaitė D, Pereira P. Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: a review. Science of the Total Environment, 2021, 781: 146716.
- [12] 赵志刚, 余德, 韩成云, 王凯荣. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力. 生态学报, 2017, 37(24): 8411-8421.
- [13] 张晓荣, 李爱农, 南希, 雷光斌, 王昌博. 基于 FLUS 模型和 SD 模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟. 地球信息科学学报, 2020, 22(12): 2393-2409.
- [14] Shrestha M, Acharya S C. Assessment of historical and future land-use-land-cover changes and their impact on valuation of ecosystem services in Kathmandu Valley, Nepal. Land Degradation & Development, 2021, 32(13): 3731-3742.
- [15] 李龙, 吴大放, 刘艳艳, 龚建周, 刘毅华, 郑金育. 基于 CA-Markov 模型的惠州市生态与经济协调度时空演变特征及模拟预测. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 161-170.
- [16] 顿耀龙, 王军, 白中科, 陈晓辉, 郭义强. 基于灰色模型预测的矿区生态系统服务价值变化研究——以山西省平朔露天矿区为例. 资源科学, 2015, 37(3): 494-502.
- [17] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估. 生态学报, 2021, 41(1): 360-373.
- [18] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟. 生态与农村环境学报, 2019, 35(12): 1531-1540.
- [19] 杨露, 颜耀文, 宗乐丽, 邱天, 焦继宗. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568-579.
- [20] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 陈进钊. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 531-542.
- [21] 徐媛银, 郭冻, 薛达元, 孙思琦. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变. 生态学报, 2019, 39(6): 1969-1978.
- [22] 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. 生态学报, 2019, 39(21): 7815-7828.
- [23] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [24] Gao W, Cheng G W, Liu C E. Incorporating carbon sink of harvested wood products into ecological footprint accounting: model and case study. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): 1770629.
- [25] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于净初级生产力的生态足迹模型及其与传统模型的对比分析. 生态环境学报, 2010, 19(1): 191-196.
- [26] 王明常, 郭鑫, 王凤艳, 张馨月. 基于 FLUS 的长春市土地利用动态变化与预测分析. 吉林大学学报: 地球科学版, 2019, 49(6): 1795-1804.
- [27] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 邱全毅, 王琳, 唐立娜. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [28] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 张学玲, 曾珩. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [29] 王蒙. 基于 FLUS 模型的土地利用变化模拟与预测方法研究. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(1): 161-166.
- [30] 方林, 蔡俊, 刘艳晓, 袁宏伟, 李灿锋. 长三角地区生态系统服务价值动态演化及驱动力分析. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 556-565.