

DOI: 10.5846/stxb201805301197

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.

Wang J F, Liu F, Bai X Y, Dai W, Li Q, Wu L H. The spatial and temporal evolution and simulation forecast of ecosystem service values in southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7057–7066.

西南地区生态系统服务价值时空演变及模拟预测

王金凤^{1,2,4}, 刘方¹, 白晓永^{2,3,*}, 代稳⁴, 李琴², 吴路华²

1 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550001

2 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550001

3 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 安顺 562100

4 六盘水师范学院旅游与历史文化学院, 六盘水 553004

摘要: 生态系统服务价值(ESV)分析对构建生态安全格局和实现区域可持续发展具有决定作用,为揭示西南地区ESV过去-现在-未来时空演变规律,运用ESV计算体系对西南地区2005—2015ESV动态演变进行定量分析,采用Logistic-CA-Markov耦合模型预测2025年ESV格局。结果表明:(1)2005—2015年西南地区总体呈现增长的趋势,其值达到20.85亿元,主要受青海、西藏水域ESV增加所致,青海、西藏ESV增长率占绝对优势。(2)空间上呈现西北和东南部ESV高、北部ESV低的分布格局;不同类型和不同等级的ESV在空间上相互转换,低等级向高等级转化明显,其他生态景观向建设用地亏损流动减少的价值不足以抵消向水域流动增加的价值,盈利大于亏损,生态环境明显好转。(3)Logistic回归分析各生态景观的ROC值均大于0.87,拟合结果能够满足预测要求;CA-Markov模拟ESV空间布局,Kappa系数为0.86,可以在整体上较准确的反映其空间演变格局。(4)2015—2025年ESV空间演化表明西南地区各区域生态环境总体趋于良好,但建设用地增加的生态负效应不可忽视,还需合理进行用地布局。研究揭示了西南地区过去-现在-未来ESV时空演化规律,提供了长时间序列的时空演化图谱,对该地区实施卓有成效的生态规划及可持续发展提供了科技支撑和重要参考。

关键词: 生态系统服务价值; 时空演变; 元胞自动机; 模拟预测; 西南地区

The spatial and temporal evolution and simulation forecast of ecosystem service values in southwest China

WANG Jinfeng^{1,2,4}, LIU Fang¹, BAI Xiaoyong^{2,3,*}, DAI Wen⁴, LI Qin², WU Luhua²

1 College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550001, China

2 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550001, China

3 Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun 562100, China

4 School of Tourism, Historical Culture, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China

Abstract: The ecosystem service value (ESV) plays a key role to build a global ecological security pattern in order to reveal the evolution characteristics and future evolution of ESV in southwestern China. The revised ESV coefficient was used to quantitatively analyze the dynamic evolution of ESV in the study area from 2005 to 2015. We used the logistics-CA-Markov model to predict the ESV space evolution in 2025. The results showed that: (1) From 2005 to 2015, the total ESV increased by 20.85 billion RMB in southwest China mainly due to the increase of ESV in Qinghai and Tibet waters, and the growth rate of ESV had absolute advantages in Qinghai and Tibet. (2) In the study area, the distribution patterns of ESV in the northwest and southeast were high and low in the north. ESV of different types and grades were spatially converted, and

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502300, 2016YFC0502103); “西部之光”人才培养计划(A类)([2018]X); 贵州省科技计划(2017-2966)

收稿日期: 2018-05-30; 网络出版日期: 2019-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@126.com

the conversion from low to high grades was obvious. The profit was greater than the loss, and the ecological environment was obviously improved. (3) The Logistic regression analysis showed that the ROC values of all ecological landscapes were more than 0.87, and the fitting results could meet the forecasting requirement. CA-Markov simulated spatial layout of ESV, and the Kappa coefficient was 0.86, which could accurately reflect the spatial evolution pattern of the overall landscape. (4) The spatial evolution map showed the dynamic changes of ESV in various regions of southwest China from 2015 to 2025, reflecting the advantages and disadvantages of the ecological environment. The general trend of the ecological environment in the region tends to be good, but the ecological negative effect of the increase in construction land can not be ignored. It is necessary to rationalize the layout and build an environment-friendly society. In the future, the ecological planning must be carefully laid out. This study provides a detailed spatial evolution map of ESV. It is significance to the implementation of the effective ecological planning and provides a scientific basis for achieving sustainable development.

Key Words: ecosystem service values; spatial and temporal evolution; cellular automaton; simulation prediction; southwest China

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^[1-2],西南地区地处长江、珠江两江上游是我国重要的生态屏障,同时该地区自然地理环境复杂多样,喀斯特地貌广泛分布,也是我国生态环境极度脆弱的区域,因此该地区ESV的时空格局演化,对构建我国生态安全格局和实现区域可持续发展具有至关重要的作用。ESV作为生态环境重要组成部分和实现生态资产转化的重要途径,早已引起了国内外众多学者的关注^[3-8],他们从不同尺度区域生态景观转变引起的ESV变化进行探讨。Costanza等率先对全球16种生态景观用地的服务功能进行货币价值评估。谢高地等^[9]结合中国的实情,构建了符合中国实情的ESV计算体系,并对不同生态景观的ESV大小进行了评估^[10-11]。陈永春等基于土地利用变化和ESV评估模型对安徽省市域尺度上土地利用变化对ESV的影响进行了评估分析^[12]。张斯屿等基于InVEST模型对县域尺度ESV进行了评估^[13]。与此同时,一些专家^[14-16]还采用灰色模型和系统动力学等模型进行区域ESV的预测,为区域可持续发展提供参考。近年来,Sutton等使用人类消费和实际的生产力损失两个数据集来描述对ESV的影响,获取了每年损失的ESV量化数据^[17]。Teoh等利用与人类有关的可操作性、国内生产总值和ESV稀缺性等因素解释了全球文化ESV经济价值趋势^[18],这些研究推动了ESV在重大决策中的应用,使得ESV在国家战略中具有十分重要的意义。

尽管国内外学者在计算不同地区ESV变化和提供政策参考方面取得了大量成果,但以往研究大多为单一的数据阐述,难以在空间上明确过去-现在ESV盈亏的具体位置,这就使得在空间位置上落实生态补偿机制面临困境。此外,对不同区域ESV未来盈亏走向空间格局演化研究较少,难以明确这些地区未来时空演化格局,摸清未来发展方向,致使这些地区在用地布局和明确经济发展方向上存在严重制约。基于此,本文以生态环境极富代表性的西南地区为研究对象,运用ESV计算体系对该区过去-现在(10年)ESV空间盈亏格局演变分析,采用Logistic-CA-Markov耦合模型预测其ESV未来10年空间演变格局。通过揭示西南地区过去-现在-未来ESV时空演化规律,提供长时间序列的时空演化图谱,将有助于西南地区制定详细生态规划和落实生态资产转换政策,为西南地区社会经济发展和生态环境保护提供决策支持。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

西南地区由四川省、重庆市、贵州省、云南省、广西壮族自治区及西藏、青海的部分地区组成,地处21°48′—37°36′N, 82°42′—113°41′E,总面积约230万km²(图1)。平均海拔3600m,最高海拔高度为7195m。地跨中国一、二级阶梯,地势西高东低呈阶梯状下降,具有高原、平原、盆地、丘陵等多种地貌类型。气候类型从低纬到高纬具有热带季风气候、亚热带季风气候、温带大陆性气候、高原山地气候等类型。降水量200—

2700mm,降水差异大,主要集中于夏季,干湿分明。植被具有热带雨林、常绿阔叶林、草原等多样类型。该区横跨多种地貌类型,生态类型复杂,具有 ESV 研究典型性和代表性。

1.2 数据来源

本文所需数据主要包括西南地区土地利用图、海拔、人口密度、国内生产总值、统计年鉴等数据,数据来源具体如下(表 1)。

2 研究方法

2.1 生态服务价值测算

据 Constanza 等人^[1]估算 ESV 方法,其计算公式为:

$$ESV = \sum A_i V C_i \quad (1)$$

$$ESV_s = \sum A_i V C_{si} \quad (2)$$

式中,ESV 为某类生态景观的总体生态系统服务价值, A_i 为第 i 类生态景观类型的面积, $V C_i$ 为第 i 类生态景观生态价值系数; ESV_s 为某类生态景观的单项服务价值, $V C_{si}$ 为单项 ESV 系数。每类生态景观的单项服务价值主要包括食物生产、原材料生产、水源涵养、气体调节、气候调节、废物处理、娱乐文化价值、生物多样性保护。研究区的生态景观类型为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 个类型,分别对应于农田、森林、草地、水体 & 湿地、荒漠生态系统类型,建设用地参考董家华^[19]、石焱等^[20]的研究,确定其在水源涵养和废物处理方面生态效益为负值,其他方面生态价值为 0。其余各类生态景观的单项服务价值系数参照谢高地中国生态系统单位面积生态服务价值当量表。1 个生态服务价值当量因子的经济价值以粮食产量的净利润为计算准则,同时结合王航等^[21]提出的 CPI 指数修正 ESV 系数法进行西南地区 ESV 系数的计算,2005 年的西南地区平均 CPI 为 101.8%,2015 年为 101.4%,为了后期预测模拟时的 ESV 对比研究,以 2015 年为基准计算整个西南地区不同生态景观类型 ESV 系数(表 2)。

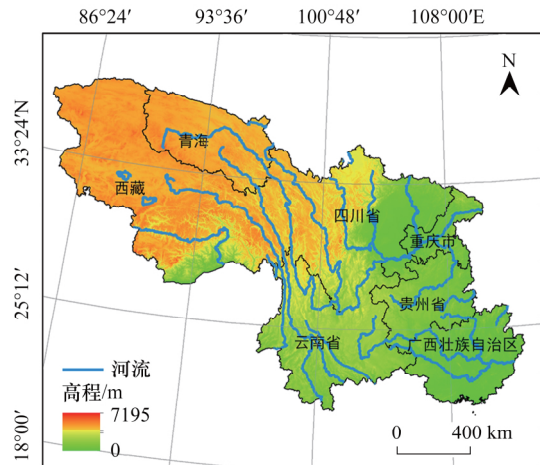


图 1 研究区空间位置分布示意图

Fig.1 The spatial distribution of the study area

表 1 主要数据来源

Table 1 The basic data and their sources

数据类型 Type of data	来源 Data Sources	网站 Website link
统计年鉴 Statistical yearbook	中华人民共和国国家统计局	http://www.stats.gov.cn
生态景观类型图 Land use map	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
人口密度图 POP map	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
国内生产总值图 GDP map	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
高程图 DEM map	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/
行政区划图 Administrative map	国家地球系统科学数据共享平台	http://www.geodata.cn/

POP: Population density map; DEM: Digital elevation model map

表 2 西南地区各生态景观单位面积 ESV 系数/(元/hm²)

Table 2 The ESV coefficient of ecological landscape per unit in southwest China

生态景观类型 Landscape type	耕地 Farmland	林地 Formland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Building land	未利用地 Unused land
ESV	6848.02	21654.08	7175.28	53852.62	-6016.75	415.97

ESV 系数(Ecological service values coefficient, ESVC)

2.2 Logistic-CA-Markov 预测模型

运用 Logistic 回归获取分布适宜性图集, Markov 模块得到转移概率, 在 CA 驱动模块实现模拟运算, 完成模拟预测。

2.2.1 Logistic 回归

利用 Logistic 回归方程构建研究区因变量与影响生态景观类型产生变化的自变量之间的模型^[22], 具体公式如下:

$$\text{logit} \left[\frac{p_i}{1 - p_i} \right] = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_m x_m \quad (3)$$

$$p_i = \frac{\exp(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_m x_m)}{1 + \exp(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_m x_m)} \quad (4)$$

式中, p_i 表示出现某种生态景观类型的概率, b_0 为回归模型常数项, $b_1 - b_m$ 为回归系数, $x_1 - x_m$ 表示驱动力因子。Logistic 回归结果 ROC 曲线, 取值范围从 0.5 到 1, 当 ROC > 0.75 时表明拟合结果能够满足预测要求。

2.2.2 CA-Markov 模型

Markov 转移矩阵^[23]的表达式如下:

$$s_{ij} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, S 表示面积; P 表示概率; $i, j (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, n)$ 分别表示转移前与转移后的生态景观类型。生态景观类型 s_i 转为 s_j 的转移概率 $p(s_i \rightarrow s_j) = p(s_i | s_j) = p_{ij}$ 。

CA 具备模拟复杂空间动态变化的能力^[24], Markov 模型具有长期预测的优点, CA-Markov 耦合提高了预测精度, 能在空间上较好地体现生态景观格局的演化特征。

3 结果分析

3.1 西南地区生态系统服务价值演变

西南地区自然地理环境空间差异大, 异质性较强, 精确地计算各个省份的 ESV 难度较大, 采用统一的 ESV 系数(表 2)来计算西南地区各省份各类生态景观单位面积的 ESV, 虽然难以给各省生态环境制定一个绝对的价格标签, 但能相对准确地揭示西南各省区时空二维动态演变格局和推演未来演变趋势, 为科学制定西南各省区生态规划提供参考。

3.1.1 2005—2015 年 ESV 时间变化

总体 ESV 演变。2005—2015 年西南地区总体 ESV 净增 20.85 亿元, 每年增加 2.09 亿元, 增长率 0.07% (表 3)。从生态景观 ESV 来看, 水域的 ESV 明显增加, 增幅 3.37%。其他生态景观的价值均减少, 建设用地减少最为明显, 减少了 28.68 亿元。从 ESV 变化率可以发现, 建设用地和水域的变化率最大, 建设用地和水域 ESV 变动, 一定程度上控制了西南地区 ESV 的变化。

生态景观是 ESV 的载体, ESV 的变化与生态景观面积的(图 4)变动具有一致性。10 年间水域和建设用

地面积不断增加,耕地、林地、草地、未利用地面积不断减小。西南地区河网密布,湖沼、湿地众多,具有三江源等重要的水源保护地。为加强水源保护,近年来新建了大量的人工河湖、水库和湿地。同时在气候变暖的背景下,雪线不断后退,西藏、青海等地的冰川雪山大量融化,水域面积不断增长,ESV 增加。由于西部大开发的速度加快,建设用地增长迅速,建设过程中不可避免地占用了耕地、林地、草地,使得 ESV 减少。西南地区的 ESV 在生态景观用地两增四减的过程中呈现稳步增长的趋势。

表 3 2005—2015 年 ESV 贡献和变化

Table 3 The contributions and changes of ESV from 2005 to 2015

生态景观类型 Landscape type	2005		2015		2005—2015		
	ESV/billion RMB	贡献比例 Contribution ratio/%	ESV/billion RMB	贡献比例 Contribution ratio/%	变化量 Change amount/ billion RMB	趋势 Trend	变化率 Rate of change/%
耕地 Framland	2214.08	7.48	2182.73	7.37	-31.35	↓	-1.42
林地 Forstland	17420.25	58.86	17405.76	58.77	-14.49	↓	-0.08
草地 Grassland	6826.05	23.07	6816.31	23.02	-9.74	↓	-0.14
水域 Water area	3120.41	10.54	3225.57	10.89	105.16	↑	3.37
建设用地 Building land	-62.43	-0.21	-91.12	-0.31	-28.68	↓	45.94
未利用地 Unused land	75.36	0.25	75.31	0.25	-0.05	↓	-0.06
总计 Total	29593.72	100.00	29614.57	100.00	20.85	↑	0.07

单项 ESV 演变。西南地区 2005—2015 年的生态系统单项服务价值变化不显著(图 2)。废物处理、水源涵养、气体调节、气候调节、娱乐文化价值在增加,废物处理功能增加最明显,增长 0.35%,与水域大面积的增长相关;土壤形成与保护、食物生产、原材料生产、生物多样性保护的价值在减少,土壤形成与保护单项服务价值降低明显,减少 0.19%,是建设用地增加占用耕地、林地、草地所致。

2005—2015 年西南地区生态系统服务价值的构成中,土壤形成与保护单项服务价值在整个生态服务中占据着主导地位,其所形成的价值占总价值的 18% 以上。林地、草地生态景观为西南地区主要用地类型,其面积占总面积的 70% 以上,且分布广泛,故具有较高的土壤形成与保护能力。最小的生态系统单项服务价值是食物生产,占总价值的 3% 以下,食物生产的单项服务价值在 ESV 构成中最小,同时西南地区地表起伏大,耕地面积小且分布零星,因此食物生产价值难以体现。

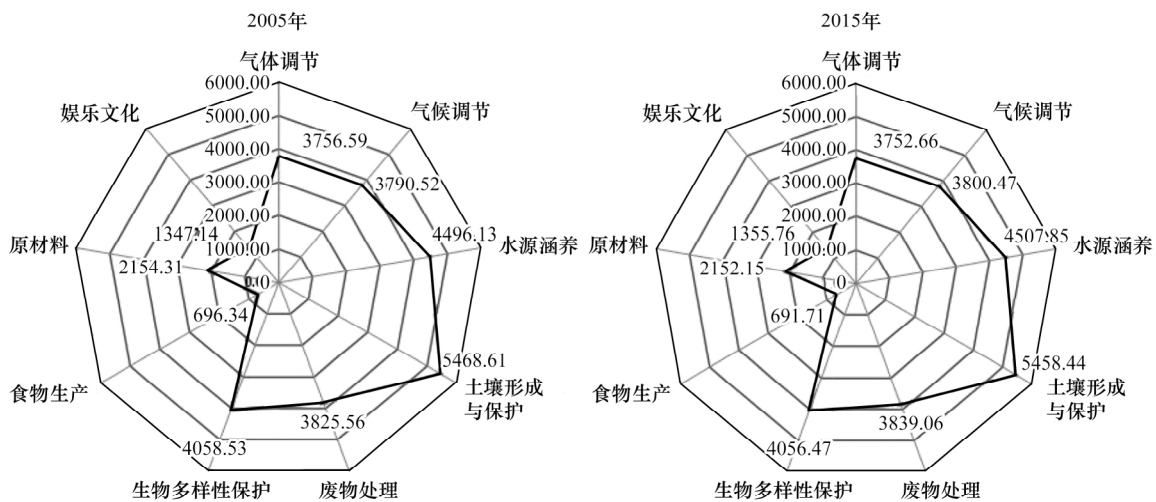


图 2 2005 和 2015 年单项 ESV/亿元雷达图

Fig.2 The radar map of single ESV/billion RMB in 2005 and 2015

3.1.2 2005—2015 年 ESV 空间演变

ESV 空间盈亏流动。基于 ESV 流动^[25],从表 4 可以看出,各类生态景观的 ESV 在空间上进行了不同程度的相互转换。耕地受城市建设占用,退耕变成林地草地,少量转化为水域和未利用地,ESV 盈亏流动中净减少 13.58 亿元。林地被河湖淹没转化为水域,ESV 增加,林地被建设损失价值最大,达 23.70 亿元。草地转化为水域盈利价值高达 41.44 亿元,流向耕地、建设用地和未利用地其价值明显亏损。未利用地是一种后备资源,景观转换中 ESV 变动不显著。总体而言,耕地、林地、草地、水域以及未利用地向建设用地亏损流动,减少的价值不足以抵消其他生态景观向水域的流动带来的盈利,西南地区的 ESV 净增长。

ESV 空间分布变化。根据 ESV 的数值大小,采用自然断点法,将研究区的 ESV 分为 6 个级别,从图 3 可以看出,西南地区各省 ESV 等级空间上呈现出西北部和东南部高、中部和北部低的空间分布特点。极高 ESV 区主要分布在青海、西藏高原区和广西壮族自治区山区丘陵地带,青海、西藏地区,人口稀少,植被茂盛,水源保护地较多,生态优良。广西壮族自治区山区丘陵地带雨热同期,植被覆盖度高,生态环境良好。极低 ESV 区主要分布在四川省、贵州省和云南省三省交界的周边区域。三省交界的周边区域山峦众多,沟壑纵横,喀斯特地貌广泛发育,植被覆盖度低。

表 4 2005—2015 年 ESV 盈亏流动表/亿元

Table 4 The ESV profit or loss values from 2005 to 2015

生态景观类型 Landscape type	耕地 Farmland	林地 Forstland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Building land	未利用地 Unused land	2005 年 Year
耕地 Farmland	0.00	20.24	0.20	25.77	-44.54	-0.05	1.62
林地 Forstland	-12.98	0.00	-23.21	13.14	-23.70	-1.41	-48.16
草地 Grassland	-0.11	24.95	0.00	41.44	-8.13	-1.78	56.37
水域 Water area	-2.57	-0.66	-4.14	0.00	-2.97	-9.24	-19.57
建设用地 Building land	2.08	0.80	0.14	1.56	0.00	0.00	4.57
未利用地 Unused land	0.00	0.05	0.98	25.05	-0.06	0.00	26.02
2015 年 Year	-13.58	45.38	-26.03	106.95	-79.40	-12.48	20.85

10 年期间西南地区的各个等级的 ESV 相互流转,西藏低级 ESV 向中级 ESV 转化,中级 ESV 向较高 ESV 转化。云南省较高 ESV 向高值 ESV,高值 ESV 向极高 ESV 演变。尽管存在高等级向低等级 ESV 转化,但低等级 ESV 向高等级 ESV 转化较为明显,ESV 净增长,表明生态环境治理过程中,生态环境不断改善,生态环境逐步变好。

3.2 西南地区生态系统服务价值预测

ESV 的变化主要受生态景观变化的影响,要对 ESV 进行有效预测,则需要对生态景观进行准确的模拟,在此基础上对进一步对 ESV 进行预测。

3.2.1 预测驱动因子分析

采用 Logistic 回归模型分析生态景观与驱动其变化的因子之间的数量关系,以高程(DEM)、坡度(SLOPE)、距离水域的距离(DOR) 3 个自然因子和人口密度(POP)、国内生产总值(GDP)、距离建设用地的距离(DOB) 3 个人文因子^[26]与 6 种生态景观类型进行 Logistic 回归。从逻辑回归分析方程的回归系数可以看出(表 5),耕地分布与人口密度、坡度密切相关,主要分布于多分布于人口极为集中,坡度较为平缓的区域。水域分布与高程和人口密度相关,多分布于海拔较低的区域。建设用地分布受国民生产总值和人口密度的影响,多分布于人口密度大,国民生产总值高的区域。林地、草地、未利用地的分布主要受自然因子驱动。

尽管驱动生态景观分布发生变化的因子各不相同,但生态景观类型的分布受自然的驱动较人文更明显,是自然背景约束下人类活动的结果。从 ROC 的回归结果可以看出,各生态景观类型的 ROC 值均在 0.87 以上,所选驱动因子能够较好的解释生态景观的分布状况,生态景观表面概率分布和真实分布之间具有较好的一致性。

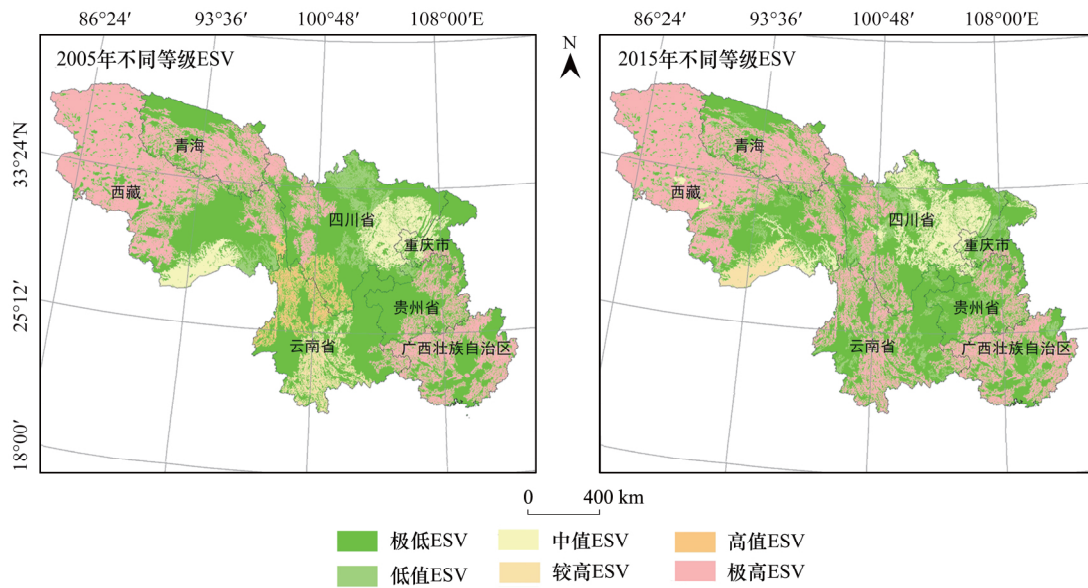


图3 2005年和2015年不同等级ESV空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of ESV at different levels in 2005 and 2015

表5 逻辑回归方程和ROC检验

Table 5 Logistic regression equation and ROC test

生态景观类型 Landscape type	回归方程 Regression equation	ROC
耕地 Framland	$\text{Logit}_{(\text{fram})} = -6.00 + 0.10\text{DOB} - 0.90\text{DEM} + 0.14\text{GDP} + 6.74\text{POP} + 0.05\text{DOR} - 0.95\text{SLOPE}$	0.94
林地 Forstland	$\text{Logit}_{(\text{forst})} = -5.62 + 0.02\text{DOB} - 0.64\text{DEM} - 1.58\text{GDP} + 6.60\text{POP} - 0.12\text{DOR} + 0.83\text{SLOPE}$	0.92
草地 Grassland	$\text{Logit}_{(\text{grass})} = -5.78 + 0.05\text{DOB} + 0.75\text{DEM} - 1.05\text{GDP} + 4.16\text{POP} - 0.01\text{DOR} - 0.23\text{SLOPE}$	0.93
水域 Water area	$\text{Logit}_{(\text{water})} = -6.94 - 0.02\text{DOB} + 0.56\text{DEM} + 0.47\text{GDP} + 1.04\text{POP} + 0.11\text{DOR} - 0.32\text{SLOPE}$	0.87
建设用地 Building land	$\text{Logit}_{(\text{building})} = -7.45 - 0.22\text{DOB} - 0.50\text{DEM} + 2.19\text{GDP} + 0.80\text{POP} + 0.17\text{DOR} - 0.23\text{SLOPE}$	0.87
未利用地 Unused land	$\text{Logit}_{(\text{unused})} = -8.43 - 0.19\text{DOB} - 1.00\text{DEM} - 0.07\text{GDP} + 1.17\text{POP} + 0.08\text{DOR} + 0.15\text{SLOPE}$	0.92

DOB: 距离建设用地的距离; DEM: 高程; GDP: 国内生产总值; POP: 自然因子和人口密度; DOR: 距离水域的距离; SLOPE: 坡度

3.2.2 预测精度评价

模拟结果的准确性是预测的关键, 尽管 2015 模拟图与真实图空间布局极为相似, 但生态景观受自然背景和人类活动的制约, 要精确的预测是比较困难的。Kappa 系数是一种计算分类精度的方法, 运用 IDRISI 中的精度检验模块对 2015 年西南地区生态景观类型图模拟结果进行验证, Kappa 结果为 0.86, Kappa 结果越接近 1 说明模拟精度越高, 可以在整体上能较准确的反映其空间演变轨迹, 较好地对 ESV 进行模拟预测。

为了进一步验证各类景观的模拟精度, 将各类生态景观分别提取出来, 逐个做 Kappa 检验(见表 6), 可以看出整体的精度验证只能说明整体模拟与实际的拟合程度, 不能代表每一类生态景观的拟合程度。建设用地和水域 Kappa 系数相对较低, 建设用地相对于其他生态景观而言, 面积小, 元胞个数少, 空间分布较零散, 受人类活动影响显著, 因此相对于生态景观类型面积大, 分布相对集中, 主要受自然背景的控制的景观而言, 其模拟精度相对较低。水域是研究区增长面积最多, 增长幅度最快的景观, 准确模拟其空间位置难度较大。每种类型的 Kappa 系数均在 0.59 以上, 表明预测的各类生态景观及 ESV 空间布局具有可信性。

3.2.3 2025 年 ESV 预测

基于 2005—2015 年的生态景观转移矩阵和 Logistic 回归分析生成的适宜性图集, 运行 CA-Markov 得到 2015 年和 2025 年生态景观预测结果(图 4)。利用预测出的 2025 年生态景观图, 进行 2025 年 ESV 分析。未来 10 年, 西南地区废物处理、水源涵养、气候调节、娱乐文化单项价值服务价值将持续增加。林地、草地、和水

域依然是 ESV 的主要贡献景观。总体的 ESV 在 2015 年的基础上增长 6.02% ,2025 年将达到 31398 亿元。

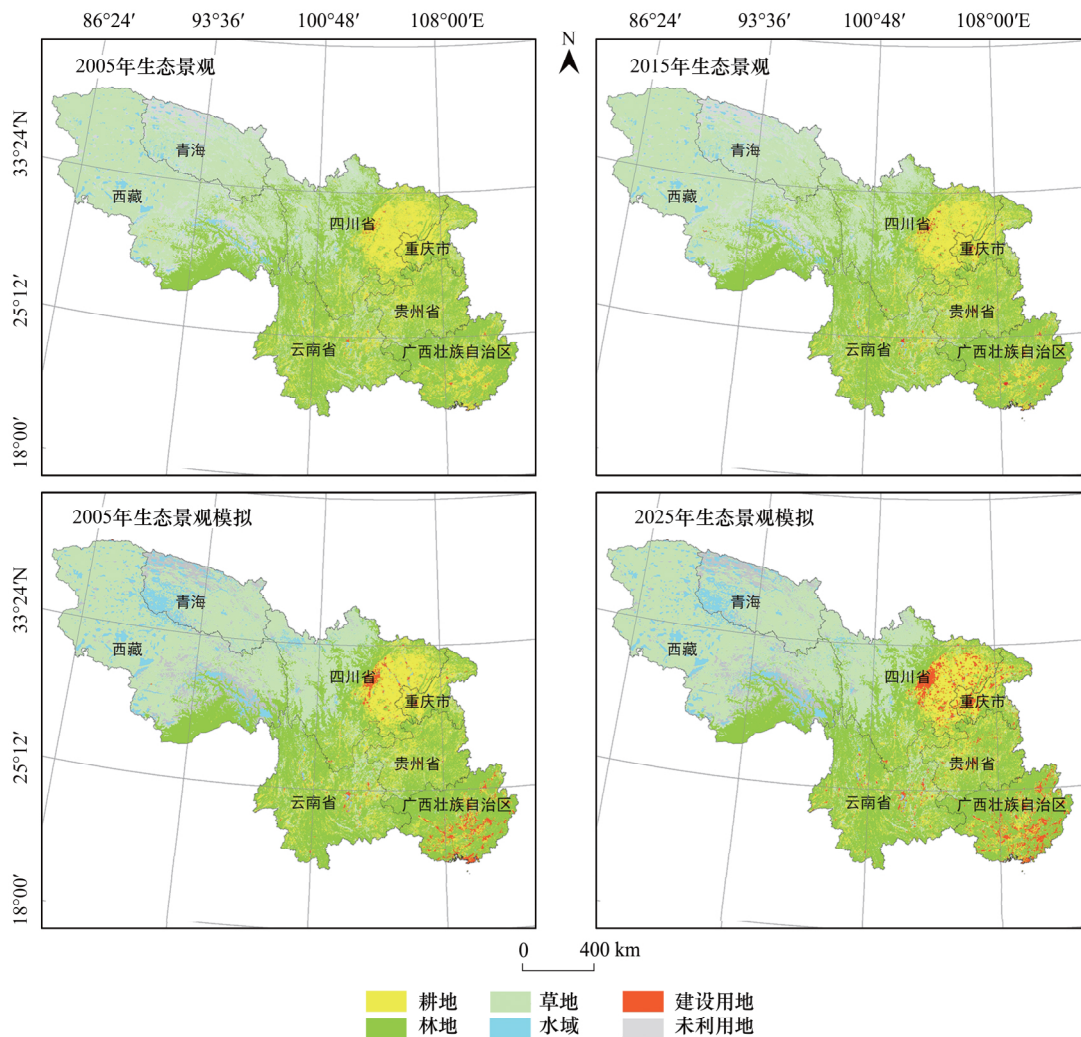


图 4 西南地区生态景观分布图
Fig.4 The map of landscape in Southwest China

尽管自然环境持续向良性发展 ,但 ESV 未来演化的过程中 ,明确那些区域的 ESV 在增加 ,那些区域在减少 ,对实施卓有成效的生态规划具有十分重要的意义。基于 ESV 空间转移 ,在空间上提取了 ESV 增加和减少的图斑(图 5)。

表 6 生态景观类型模拟精度评价表

Table 6 Ecological landscape type simulation accuracy evaluation table

真实值 True value	模拟值 Value of simulation		Kappa Kappa coefficient	真实值 True value	模拟值 Value of simulation		Kappa Kappa coefficient
	耕地	非耕地			水域	非水域	
耕地 Farmland	68897	414	0.91	水域 Water area	58457	4622	0.67
非耕地 Non-farmland	1243	12735		非水域 Non-water area	80023	2185717	
林地 Formland	699556	90410	0.87	建设用地 Building land	11963	4670	0.59
非林地 Non-formland	70271	1468582		非建设用地 Non-building land	31186	2281000	
草地 Grassland	829703	117279	0.88	未利用地 Unused land	162421	22830	0.90
非草地 Non-grassland	64437	1317400		非未利用地 Non-unused land	13257	2130311	

ESV 空间上盈亏流转 ,ESV 增加 3081.15 亿元 ,其增加的区域主要分布在青海西北部和西藏东南部和云南省 ,主要是水域面积增加 ,引起了生态效益的增长。ESV 减少 1158.50 亿元 ,主要受建设用地继续增加 ,各项景观向建设用地亏损流动所致。ESV 减少的区域主要集中在四川省成都平原周边、广西壮族自治区中部 ,以及重庆市的大部分区域。ESV 盈利区域大于亏损区域 ,西南地区 ESV 持续增加 ,生态环境继续好转。

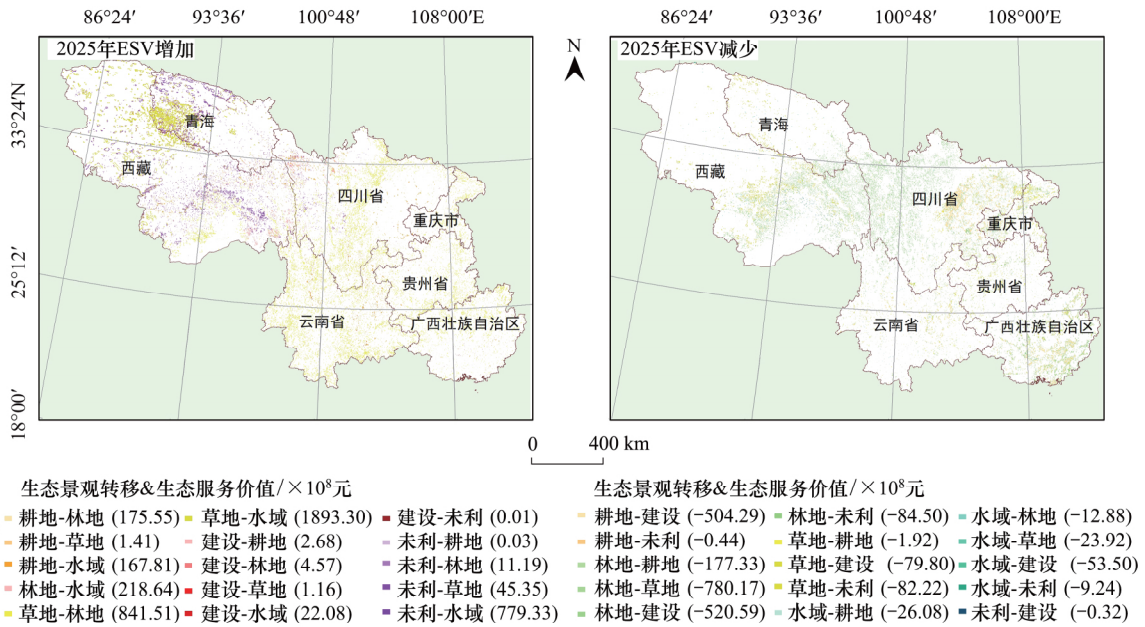


图5 2025年预测 EVS 区域分布变化趋势图

Fig.5 Prediction of the distribution trend of EVS in 2025

4 讨论

生态服务补偿制度的推行,使得生态服务价值的研究越来越受到重视,国内外对 ESV 定量评估日益增多。本研究对西南地区 2005—2015ESV 动态演变进行定量分析,采用耦合模型预测 2025 年 ESV 格局,尽管揭示了西南地区过去-现在-未来 ESV 时空演化规律,对该地区实施卓有成效的生态规划及可持续发展提供了重要参考。但在评估方法上仍存在不确定性,由于生态服务与生态功能不可能完全匹配,致使 ESV 的精确计算存在难以克服的障碍,在未来的研究中需要对各种生态系统服务功能进行更为详细的分类并设计更为准确的价值核算体系,利于更加准确阐明生态服务价值的演变特征。其次,本文运用 Logistic-Markov-CA 耦合模型精确模拟各类生态景观,预测 ESV 空间演变。与仅依靠转移概率来预判未来演化趋势的研究相比,本研究在空间布局模拟上取得了一定进展,ESV 未来空间布局具有可信性。生态景观受到自然背景和人类活动的影响,其变化是一个复杂的过程,演化驱动机制庞大,因此每类生态景观 Kappa 结果与整体的 Kappa 系数难以一致。第三,ESV 的进一步研究,还需要考虑经济发展与生态环境之间的协同与制约关系,经济收益与生态损失相关联,通过动态变化模型研究不同发展路径下,经济发展与环境变化之间耦合变化趋势,建立生态服务权衡阈值动态数据库,为当权者提供不同 ESV 变化与人类福祉之间的演变谱系,为政府提供决策支持。

5 结论

基于 ESV 计算体系,评估西南地区近 10 年 ESV 演变特征,为该地区生态规划和土地利用管理提供了决策参考。2005—2015 年该地区总体 ESV 稳步增长,增长了 0.07%,其增长主要来源于水域贡献,单项 ESV 动态变化不显著;空间上各类生态景观和不同等级的 ESV 进行了不同程度相互流转,低等级向高等级 ESV 转化较为明显,其他生态景观向建设用地亏损流动减少的价值不足以抵消向水域流动增加的价值,生态环境不断

改善,生态效益持续增长。

运用 Logistic-Markov-CA 耦合模型对西南地区 2025 年 ESV 进行预测,Logistic 回归分析结果表明,各类生态景观的 ROC 值均大于 0.87,拟合结果能够满足预测要求。整体 Kappa 系数为 0.86,可以在整体上较准确的反映其空间演变格局。2025 年总体的 ESV 在 2015 年的基础上增加 1783.44 亿元,ESV 盈利区域大于亏损区域。尽管 ESV 持续增长,但建设用地增加的生态负效应不可忽视,在未来生态规划过程中,还需慎重考虑。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, Arrow K, Dasgupta P, Ehrlich P R, Folke C, Jansson A, Jansson B O, Kautsky N, Levin S, Lubchenco J, Mäler K G, Simpson D, Starrett D, Tilman D, Walker B. The value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, 289(5478): 395-396.
- [3] Schulp C J E, Alkemade R. Consequences of uncertainty in global-scale land cover maps for mapping ecosystem functions: an analysis of pollination efficiency. *Remote Sensing*, 2011, 3(9): 2057-2075.
- [4] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [5] Yi H C, Güneralp B, Filippi A M, Kreuter U P, Güneralp I. Impacts of land change on ecosystem services in the san Antonio river basin, Texas, from 1984 to 2010. *Ecological Economics*, 2017, 135: 125-135.
- [6] Mancini M S, Galli A, Coscieme L, Niccolucci V, Lin D, Pulselli F M, Bastianoni S, Marchettini N. Exploring ecosystem services assessment through Ecological Footprint accounting. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 228-235.
- [7] Song X P. Global estimates of ecosystem service value and change: taking into account uncertainties in satellite-based land cover data. *Ecological Economics*, 2018, 143: 227-235.
- [8] 孔东升,张灏. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估. *生态学报*, 2015, 35(4): 972-983.
- [9] 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.
- [10] 谢高地,鲁春霞,肖玉,郑度. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估. *山地学报*, 2003, 21(1): 50-55.
- [11] 谢高地,张彩霞,张昌顺,肖玉,鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [12] 陈永春,邓国志. 资源型城市土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以安徽省淮南市为例. *水土保持通报*, 2018, 38(4): 247-252.
- [13] 张斯屿,白晓永,王世杰,秦罗义,田义超,罗光杰,李月. 基于 InVEST 模型的典型石漠化地区生态系统服务评估——以晴隆县为例. *地球环境学报*, 2014, 5(5): 328-338.
- [14] 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.
- [15] 石小亮. 吉林森工集团森林生态系统服务价值评价及预测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [16] 谭敏,褚克坚,华祖林,郝明,张满满. 基于 LUCC 的生态服务价值动态分析及预测——以徐州市区为例. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 297-301.
- [17] Sutton P C, Anderson S J, Costanza R, Kubiszewski I. The ecological economics of land degradation: impacts on ecosystem service values. *Ecological Economics*, 2016, 129: 182-192.
- [18] Teoh S H S, Symes W S, Sun H, Pienkowski T, Carrasco L R. A global meta-analysis of the economic values of provisioning and cultural ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1293-1298.
- [19] 董家华,包存宽,舒廷飞. 生态系统生态服务的供应与消耗平衡关系分析. *生态学报*, 2006, 26(6): 2001-2010.
- [20] 石磊,王如松,黄锦楼,阳文锐. 中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析. *科学通报*, 2012, 57(9): 720-731.
- [21] 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.
- [22] 吴桂平,曾永年,邹滨,齐庆超,杨松. AutoLogistic 方法在土地利用格局模拟中的应用——以张家界市永定区为例. *地理学报*, 2008, 63(2): 156-164.
- [23] 何丹,金凤君,周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化——以京津冀都市圈为例. *地理科学*, 2011, 31(8): 903-910.
- [24] 马士彬,张勇荣,安裕伦. 基于 Logistic-CA-Markov 模型的石漠化空间变化规律研究. *中国岩溶*, 2015, 34(6): 591-598.
- [25] 宁龙梅,王学雷. 基于 RS 和 GIS 的武汉市生态系统服务价值变化研究. *生态环境*, 2006, 15(3): 637-640.
- [26] 年雁云,王晓利,陈璐. 1930—2010 年额济纳三角洲土地利用景观格局变化. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 777-785.