

# 基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟

杨伟青, 张会兰

(北京林业大学 水土保持学院 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

**摘 要:**为了探究涪江流域的土地利用结构及其生态服务价值的时空变化,通过预测情景支持未来土地规划,研究基于 1980—2018 年 5 期遥感影像,构建生态系统服务价值评估模型并分析时空动态变化,采用 GeoSOS-FLUS 模拟自然发展情景、耕地安全情景、生态保护情景和快速发展 4 种情景下未来的土地利用变化及生态系统服务价值的演变趋势。结果表明:(1) 1980—2018 年,耕地面积减少 542.25 km<sup>2</sup>,减幅为 2.57%;建设用地扩张面积 525.66 km<sup>2</sup>,增幅达 255.50%。(2) 对应其生态系统服务价值呈增加趋势,由 1980 年的 776.48 亿元增加到 2018 年的 783.67 亿元,不同土地利用类型对生态系统服务价值的贡献顺序为林地>耕地>水域>草地>未利用土地。(3) 在空间上呈现上游高中下游低,下游地区大致呈现由中部向东西两侧递减趋势,流域西南部是低价值区。(4) 4 种发展情景下,2030 年的生态服务价值分别是 784.80 亿元、740.31 亿元、811.09 亿元和 751.40 亿元,相较于 2015 年变化了 1.44 亿元(增加)、-43.05 亿元(减少)、27.74 亿元(增加)和 -31.96 亿元(减少)。综上,38 年来流域生态价值提高,同时模拟结果显示为维持该流域生态安全,需要加强生态用地的抚育。

**关键词:**生态系统服务价值(ESV);多情景模拟;GeoSOS-FLUS;土地利用变化

**中图分类号:**X171; X321

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)05-0253-10

## Ecosystem Service Value Assessment and Multi-Scenario Simulation of Fujiang River Basin Based on GeoSOS-FLUS

YANG Weiqing, ZHANG Huilan

(Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station,  
School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to explore the spatial-temporal changes of land use structure and its ecosystem service value in the Fujiang River Basin, and support future land planning through prediction scenarios, based on five remote sensing images from 1980 to 2018, we constructed an ecosystem service value evaluation model to analyze the dynamic changes of time and space, and used GeoSOS-FLUS to simulate the evolution trend of future land use change and ecosystem service value under four scenarios: natural development scenario, cultivated land security scenario, ecological protection scenario and rapid development scenario. The results showed that: (1) from 1980 to 2018, the cultivated land area decreased by 542.25 km<sup>2</sup>, the decrease rate was 2.57%, and the construction land expanded by 525.66 km<sup>2</sup>, the increase rate was 255.50%; (2) the value of ecosystem services increased from 77.648 billion yuan in 1980 to 78.367 billion yuan in 2018; and the contribution order of different land use types to ecosystem service value was woodland>cultivated land>water area>grassland>unused land; (3) the value of ecosystem services in the upper reaches was higher than that in the lower reaches; the value of ecosystem services in the lower reaches decreased from the middle to the east and west; the southwest of the basin is the low value area of ecosystem services; (4) under the four

收稿日期:2021-06-30

修回日期:2021-07-22

资助项目:北京林业大学科技创新计划项目(2021ZY50);国家自然科学基金(51309006);国家重大水利资助项目"三峡工程泥沙重大问题研究课题"(12610100000018J129-01);中央高校基本科研业务费专项资金(2016ZCQ06, 2015ZCQ-SB-01)

第一作者:杨伟青(1997—),女,山东东营人,硕士,研究方向:流域水文过程与机理。E-mail:weiqing123@bjfu.edu.cn

通信作者:张会兰(1984—),女,河北保定人,博士,副教授,研究方向:流域水文过程与机理。E-mail:zhanghl@bjfu.edu.cn

development scenarios, the value of ecological services in 2030 was 78.480 billion yuan, 74.031 billion yuan, 81.109 billion yuan and 75.140 billion yuan, respectively, which changed 144 million yuan (increase), -4.305 billion yuan (decrease), 2.774 billion yuan (increase) and -3.196 billion yuan (decrease) compared with 2015. To sum up, the ecological value of the basin had improved in the past 38 years. At the same time, the simulation results show that it is necessary to strengthen the cultivation of ecological land in order to maintain the ecological security of the basin.

**Keywords:** ecosystem service value (ESV); multi-scenario simulation; GeoSOS-FLUS; land use change

生态系统服务价值(Ecosystem services value, ESV)用以鉴别、量化和货币化生态系统服务<sup>[1-2]</sup>,是制定区域生态环境管理和生态补偿政策的主要依据<sup>[3-4]</sup>。自 1997 年 Costanza<sup>[2]</sup>首先将生态系统服务分类并货币化经济价值以来,ESV 评估成为研究热点。国内学者谢高地等<sup>[5-6]</sup>随后对 Costanza 的研究成果进行修正,构建了适宜我国不同区域和不同生态系统的中国生态系统服务当量因子表,得到了广泛应用<sup>[7-8]</sup>。目前,ESV 及其评价方法<sup>[9]</sup>研究在单一生态系统<sup>[10]</sup>、区域<sup>[11-12]</sup>生态价值评估以及驱动力研究方面取得丰富进展。ESV 的未来评估对生态脆弱区域的系统规划与管理具有重要意义,然而,对 ESV 的动态变化特征以及未来演变趋势的研究仍十分匮乏。土地利用是自然环境与人类活动之间作用最明显的表现形式<sup>[13]</sup>,土地利用类型直接影响区域生态系统服务能力<sup>[14]</sup>,反过来生态系统服务的退化也会影响土地利用结构变化<sup>[15]</sup>,两者相互影响、相互制约。因而,基于情景假设的土地利用结构预测,可为 ESV 预测提供一种潜在的有效途径。

涪江流域是长江上游水土流失较为严重的地区之一,是典型的生态敏感脆弱区。在退耕还林和城镇化快速发展背景下,该区域土地利用结构已发生明显变化,但土地利用结构和生态服务价值的历史动态变化以及未来发展趋势尚不清晰。本文以涪江流域为研究区,基于 1980—2018 年的五期土地利用数据,评估其在历史时期的生态系统服务价值时空变化特征,其中基于网格和县域角度生态价值分布和占比进行研究;其次,基于研究流域未来的可能发展方向,采用 GeoSOS-FLUS<sup>[16]</sup>设置自然发展情景、耕地安全情景、生态保护情景和快速发展 4 种情景,模拟 2030 年土地利用变化结构,预测多种情景发展模式下的 ESV 未来趋势。研究结果可为流域生态保护与经济建设协同发展的提供发展提供参考,对长江经济带建设生态健康发展亦具有指导意义。

## 1 研究区概述

涪江,发源于四川省松潘县与平武县之间的岷山主

峰雪宝顶,干流全程 697 km,是长江支流嘉陵江的右岸最大的一级支流。涪江从西北向西南由高山区进入盆地丘陵区,流经川、渝两省市 32 个县区,在重庆市合川区汇入嘉陵江。流域位于东经 103°42′50″—106°16′25″、北纬 29°17′31″—33°02′42″,总面积 35 842 km<sup>2</sup>,属亚热带湿润性气候区,多年平均气温在 14.7~18.2℃,降水量在 800~1 000 mm。涪江流域是长江上游主要农业产区和重点产沙区,流域内以旱地(37.73%)、水田(19.73%)、有林地(12.35%)和草地(11.86%)为主,其中耕地面积(旱地、水田)占流域总面积的 57.46%。自 1999 年实施退耕还林政策以来,耕地面积发生明显变化;同时,流域内经济发展态势良好,城镇面积增加明显。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

基础数据包括土地利用、FLUS 模型驱动因子和生态系统服务价值当量修正 3 类(表 1)。其中,土地利用数据由 Landsat 遥感影像解译获得,栅格精度 30 m,通过外业调查和随机抽取动态图斑重复判读分析相结合的方法进行检验,耕地分类精度为 85%,其他土地利用类型的分类精度均达 75%以上,根据 Kappa 系数检验标准,解译结果通过验证<sup>[17]</sup>。模型驱动因子数据中,选用地形和可达性因素 8 个因子。当量修正数据类别中基于谢高地等<sup>[4]</sup>的研究,将主要粮食产量经济价值作为修正依据,由于涪江流域 80%以上面积位于四川省,故选取四川省主要作物统计数据。

### 2.2 技术路线

本文基于 2.1 所示数据,采用社会经济因子调整系数修正传统生态系统服务价值评估模型,构建符合流域的生态系统服务价值评估模型,运用 ArcGIS 10.2 多个处理模块探究土地利用及生态系统服务价值时空格局变化,在此基础上,运用 GeoSOS-FLUS 软件构建 4 种情景下 2030 年土地结构变化,模拟土地利用结构和生态系统服务价值的未来演变,具体如图 1 所示。

2.3 方法模型

2.3.1 生态系统服务价值评估 根据表 2 四川省主要农作物播种面积、单产及价格信息,通过式(1)计算得到单位面积农田每年自然粮食产量的经济价值为 1 901.33 元/hm<sup>2</sup>。

$$E=\frac{1}{7}\sum_{i=1}^n\frac{m_iq_ip_i}{M}$$
 (1)

表 1 研究数据列表

序号	数据种类	基础数据	数据来源
1	土地利用类型:包括耕地、林地、草地、水域、建设用和未利用土地 6 个一级地类	30 m 精度的土地利用栅格数据,1980 年、1990 年、2000 年、2015 年、2018 年共计五期	美国地质勘探局网站
2	FLUS 模型驱动因子:高程、坡度、坡向、据水域距离、据地级市距离、据县级市距离、据省道距离、据铁路距离	30 mDEM 数据,水系、行政驻地、公路、铁路矢量数据	中国科学院资源环境科学数据中心
3	生态系统服务价值当量修正:即主要作物粮食产量的经济价值	主要作物(包括稻谷、小麦、玉米、豆类作物和薯类作物)的播种面积、单产和平均价格	四川省统计年鉴中国物价统计年鉴

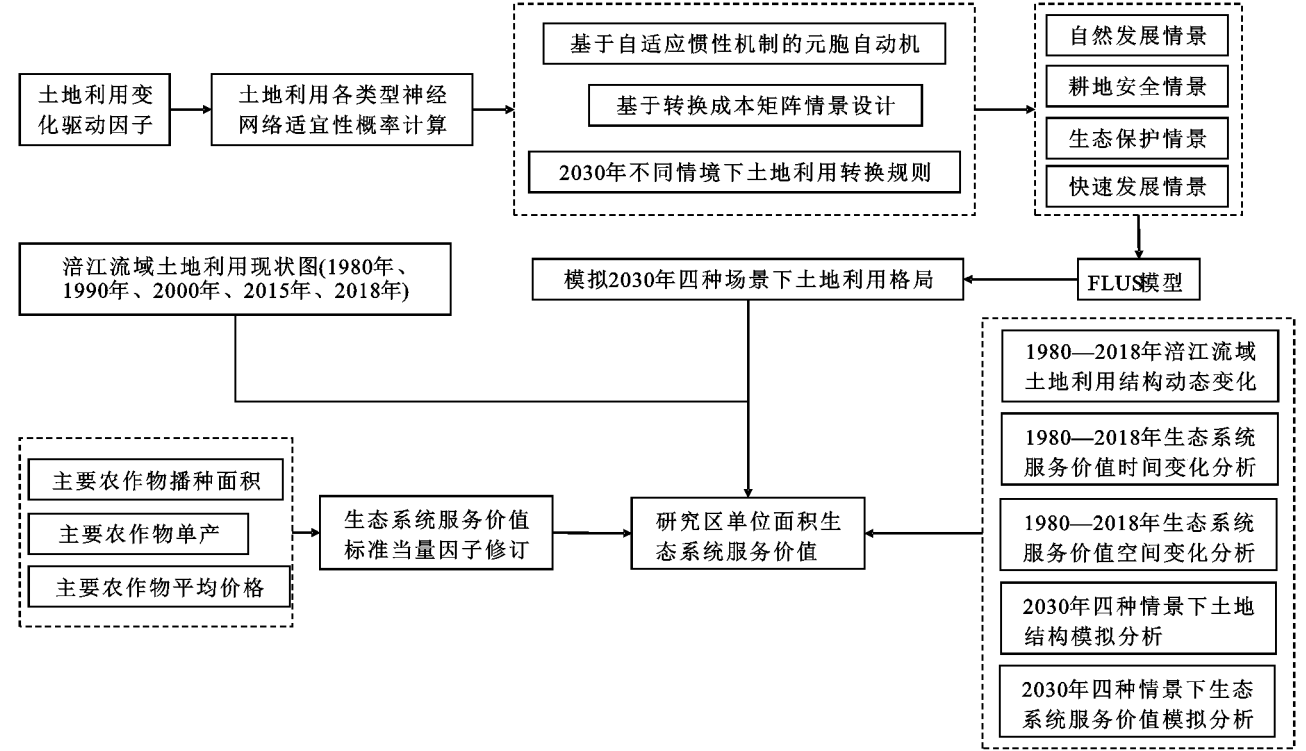


图 1 技术路线

表 2 四川省主要粮食作物播种面积、粮食单产和全国平均单价

主要作物	播种面积/hm <sup>2</sup>	作物单产/(t·hm <sup>-2</sup> )	平均价格/(元·t <sup>-1</sup> )
稻谷	1874006	7.89	2600
小麦	635007	3.89	2400
玉米	1855997	5.75	1900
豆类作物	524924	2.31	3488
薯类作物	1261204	4.29	2400

耕地价值系数由旱地、水田比例系数修正,林地、草地、水域、未利用土地分别对应二级分类中的阔叶、

式中: $E$  为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量; $1/7$  指没有人力投入下自然生态系统提供的经济价值占现有单位面积耕地提供的食物生产服务经济价值的  $1/7$ ; $n$  为粮食种类; $m_i$  为第  $i$  中粮食作物的播种面积(hm<sup>2</sup>); $q_i$  为第  $i$  种粮食作物的单产(t/hm<sup>2</sup>); $p_i$  为第  $i$  种粮食作物 2018 年的全国平均价格(元/t); $M$  为粮食作物播种的总面积(hm<sup>2</sup>)。

草甸、水系和裸地,建设用地的价值系数设定为 0,ESV 计算公式为如(2—3) 所示,得到涪江流域单位面积生态系统服务价值表(表 3),基于 ArcGIS 10. 2 研究采用 5 km×5 km 的单元网格对流域进行重采样,得到 1 600 个评价单元,基于网格计算了研究区 1980—2018 年 ESV 值以分析其空间分布特征。

$$ESV=\sum_{k=1}^nA_k\times VC_k$$
 (2)

$$ESV_f=\sum_{k=1}^n(A_k\times VC_{fk})$$
 (3)

式中:ESV 为研究区生态系统服务总价值; $n$  为土地类型数量; $VC_k$  为单位面积上土地类型  $k$  的生态系统服务价值; $A_k$  为研究区土地类型  $k$  的面积; $ESV_f$  为生态系统第  $f$  项服务功能价值; $VC_{fk}$  为研究区土地类型  $k$  的第  $f$  项服务功能价值系数。

2.3.2 FLUS 模型 FLUS 模型是刘小平等基于前人研究开发的土地预测模型,该模型基于元胞自动机

(CA)模型,引入自适应惯性和竞争机制处理不同土地利用类型之间的复杂竞争,能有效处理自然和人为因素共同作用下土地转化概率问题,其模拟的 2010—2050 年中国不同情景模拟下的土地利用变化结果,被证明精度更适用于模拟预测<sup>[16,18]</sup>,目前主要应用于土地利用模拟<sup>[19]</sup>、城市扩张模拟<sup>[20]</sup>和城市增长边界的划定<sup>[21]</sup>等方面。

表 3 单位面积生态系统服务价值 元/hm<sup>2</sup>

生态系统分类		耕地	林地	草地	水域	未利用土地
供给服务	食物生产	1949.15	551.39	418.29	1521.07	0.00
	原料生产	558.11	1254.88	627.44	437.31	0.00
	水资源供给	−1516.06	646.45	342.24	15762.06	0.00
调节服务	气体调节	1561.20	4125.90	2167.52	1464.03	38.03
	气候调节	821.61	12358.67	5742.03	4354.06	0.00
	净化环境	235.84	3669.58	1901.33	10552.40	190.13
	水文调节	2113.15	9012.32	4201.95	194392.41	57.04
支持服务	土壤保持	1292.34	5038.54	2642.85	1768.24	38.03
	维持养分循环	273.87	380.27	209.15	133.09	0.00
	生物多样性	299.41	4582.22	2414.69	4848.40	38.03
文化服务	美学景观	133.67	2015.41	1064.75	3593.52	19.01

该模型包括基于神经网络的出现概率计算模块以及基于自适应惯性模型的元胞自动机模块,前者对驱动因子的空间分布进行样本采样和神经网络训练,得到不同地类的栅格适宜性概率,后一模块基于概率计算模块结果得到各栅格在规定时间内转化的总概率,同时通过预期土地需求自适应调整、邻域因子调试、模型检验和设置转换成本完成迭代模拟参数设置,在达到迭代时间或未来数量目标时停止迭代,得到各地类空间分布情况,实现土地利用分布模拟,相关参数和具体设置情况如下:

(1) 适宜性概率计算:采用 ArcGIS 处理源数据,

包括定义坐标系、重采样以及生成距离分析图,基于 GeoSOS-FLUS 软件人工神经网络模型算法(ANN)对基期土地利用数据和各驱动因子数据进行运算获得适宜性概率(图 2):

$$\begin{aligned} sp(p,k,t) &= \sum_j w_j,k \times \text{sigmoid}(\text{net}_j(p,t)) \\ &= \sum_j w_j,k \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p,t)}} \end{aligned} \tag{4}$$

式中:  $sp(p,k,t)$  为时间  $t$ 、栅格  $p$  下  $k$  土地类型的适宜性概率; $w_j,k$  是输出层与隐藏层之间的权重; $\text{sigmoid}()$  是隐藏层到输出层的激励函数; $\text{net}_j(p,t)$  是第  $j$  个隐藏层栅格  $p$  在时间  $t$  上所接到的信号。

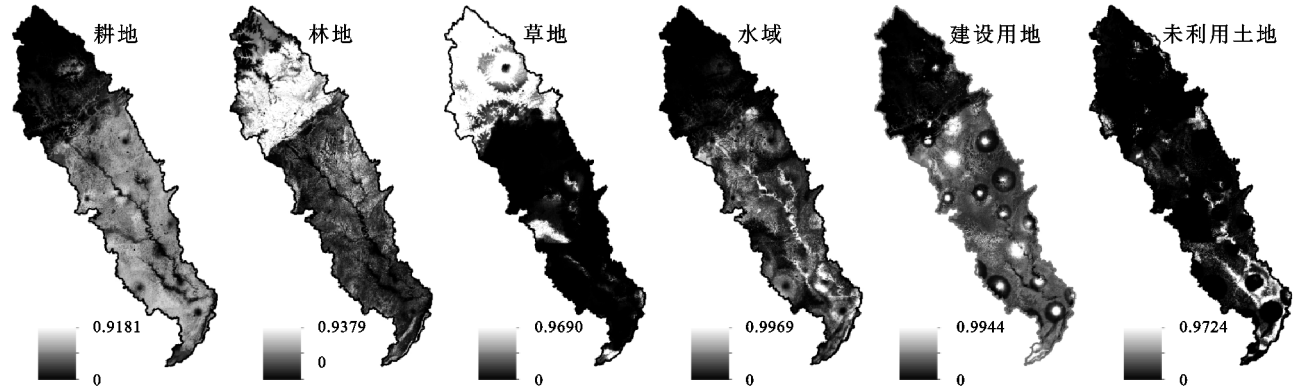


图 2 各土地利用类型适宜性概率

(2) 自适应惯性系数:即当前土地数量与土地需求的差值会在迭代过程中进行自适应调整,在模拟过

程中逐渐向目标数量接近的惯性系数,公式如式(5)所示:



$$\text{Interia}_k^t = \begin{cases} \text{Interia}_k^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ \text{Interia}_k^{t-1} \times \frac{|D_k^{t-2}|}{|D_k^{t-1}|} & 0 > |D_k^{t-2}| > |D_k^{t-1}| \\ \text{Interia}_k^{t-1} \times \frac{|D_k^{t-1}|}{|D_k^{t-2}|} & |D_k^{t-1}| > |D_k^{t-2}| > 0 \end{cases}$$

(5)

式中:Interia<sub>k</sub><sup>t</sup> 表示第 k 种用地在时间 t 上的惯性系数;D<sub>k</sub><sup>t-1</sup>,D<sub>k</sub><sup>t-2</sup> 分别指时间 t-1 和 t-2 所需栅格数与第 k 种土地类型栅格数量的插值。

(3) 邻域因子设定与模型检验:模拟精度采用 kappa 系数评价,越接近 1 表示一致性越高,当 kappa 系数大于 0.75,认为预测结果可信。邻域因子参数范围为 0~1,越接近 1 代表该土地类型扩张能力越强,通过已有研究成果、各土地类型扩张能力特征以及不断调试,设定模型邻域因子(表 4),该邻域因子模拟下 2015 年土地利用模拟结果的 Kappa 系数为 85.19%。

(4) 转换成本确定:即某类土地类型转换为其他类

型的难易程度,成本矩阵表示不同土地利用类型间的转换规则,0 表示不能转换,1 表示可以转换。本文基于 4 种发展情景设计 4 种不同转换成本矩阵(表 5)。自然发展情景下,假定未来土地变化率与 2000—2015 年的变化量一致,研究区自然条件和经济发展条件都不变的基础上实现,利用马尔可夫模型模拟土地需求量,设置所有土地类型均可互相转换;耕地安全情景下,以保护基本农田为要点,耕地严禁转出,除建设用地外均可转为耕地;生态保护情景下,按各类土地生态效益进行排序:林地、水域、草地、耕地、建设用地、未利用土地,转换原则为不允许排序高向排序低的土地类型转变;快速发展情景下,按发展需求进行排序:建设用地、耕地、林地、水域、草地、未利用土地,转换原则同生态保护情景一致。

表 4 邻域因子参数

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
邻域因子参数	0.4	0.6	0.4	0.4	0.9	0.8

表 5 转换成本矩阵

土地利用 类型	自然发展情景						耕地安全情景						生态保护情景						快速发展情景					
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
I	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0
II	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
III	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
IV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
V	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
VI	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:I,II,III,IV,V,VI 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地。

### 3 结果与分析

#### 3.1 涪江流域 1980—2018 年土地利用结构动态变化

基于 1980—2018 年涪江流域土地利用类型图(图 3)和流域不同土地利用类型面积和动态度(表 6)发现,研究区以耕地和林地为主,2018 年占比分别为 57.46%和 27.21%。土地结构变化集中在耕地的持续减少和建设用地的持续扩张,1980—2018 年,耕地面积减少 542.25 km<sup>2</sup>,减幅-2.57%。建设用地面积持续增加,1980—2018 年,建设用地面积增加 525.66 km<sup>2</sup>,增幅 255.50%。林地面积先减少后增加,1980—2000 年面积减少 132.01 km<sup>2</sup>,2000—2018 年面积增加 50.05 km<sup>2</sup>,我国 1999 年开始实施的退耕还林政策,研究区 2000 年后耕地的减少与林地的增加印证了该政策实施的效果。草地面积先增加后减少,总面积变化小,共减少 10.55 km<sup>2</sup>。水域和未利用土地面积在研究期内持续增加,分

别增加 63.52 km<sup>2</sup>,44.54 km<sup>2</sup>。根据土地利用动态度显示,城镇用地和未利用土地面积增速最快,分别为 6.72%和 5.92%,此外耕地、林地与草地有所减少,耕地的减速最快,为-0.07%,林地和草地相对稳定。

#### 3.2 涪江流域 1980—2018 年 ESV 时间变化分析

1980—2018 年 ESV 变化情况见表 7,研究期间流域 ESV 总体呈上升趋势,1980—2018 年增长了 7.19 亿元,从 ESV 结构功能来看,单项服务对 ESV 的贡献顺序是:水文调节>气候调节>土壤保持>气体调节>生物多样性>净化环境>食物生产>美学景观>原料生产>维持养分循环>水资源供给,表明流域生态系统在调节服务和支持服务中发挥着重要作用。其中,调节服务价值增加了 8.30 亿元,贡献率 115.44%,表明调节服务在流域生态系统中的主体功能仍在增强。此外,支持服务价值持续减少,减少了 1.45 亿元,供给服务增加 0.37 亿元,文化服务减少 0.02 亿元。

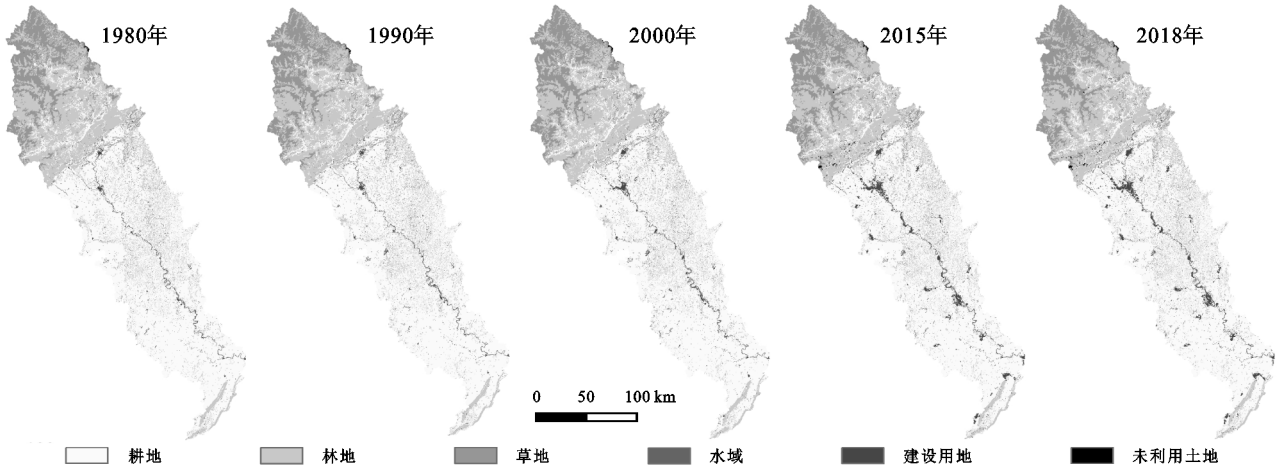


图 3 1980—2018 年涪江流域土地利用类型

表 6 1980—2018 年涪江流域土地利用面积 km<sup>2</sup>

年份	土地利用类型					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
1980	21109.10	9822.94	4250.96	387.07	205.74	19.79
1990	21045.31	9791.28	4286.01	418.81	233.55	19.32
2000	20994.23	9690.93	4356.36	423.89	318.45	19.80
2015	20615.08	9732.12	4246.96	448.74	688.96	63.97
2018	20566.84	9740.98	4240.42	450.59	731.40	64.33

表 7 1980—2018 年涪江流域生态系统服务价值结构变化 亿元

年份	供给服务			调节服务				支持服务			生物多样性	总计
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	文化服务	美学景观	
1980	48.93	26.94	−18.10	83.27	164.84	53.20	226.24	88.69	10.46	63.47	28.54	776.48
1990	48.85	26.90	−17.51	83.16	164.73	53.47	232.14	88.60	10.44	63.55	28.62	782.94
2000	48.73	26.80	−17.39	82.82	163.88	53.27	232.41	88.22	10.40	63.27	28.50	780.91
2015	48.01	26.58	−16.44	82.20	163.55	53.40	236.35	87.70	10.29	63.20	28.51	783.35
2018	47.92	26.56	−16.33	82.15	163.59	53.43	236.66	87.67	10.28	63.22	28.52	783.67

图 4 可以反映土地利用及其提供的 ESV 占比情况,从研究区土地利用结构来看,不同土地利用类型对 ESV 的贡献顺序为:林地>耕地>水域>草地>未利用土地,林地是流域 ESV 最主要的组成部分,占流域总价值的 54%~55%,另外水域也以 1%~2%的面积占比提供了 11%~13%的 ESV,在研究期间

水域的 ESV 持续增加,增加了 15.17 亿元,贡献率 210.99%,对流域 ESV 增长的贡献率最大,表明流域 ESV 的增加,与水源涵养和林业工程等生态建设工程的实施密切相关。耕地提供的服务价值持续减少,林地和草地也呈现总体减少态势,耕地、林地和草地分别减少了 4.19 亿元、3.58 亿元和 0.23 亿元。

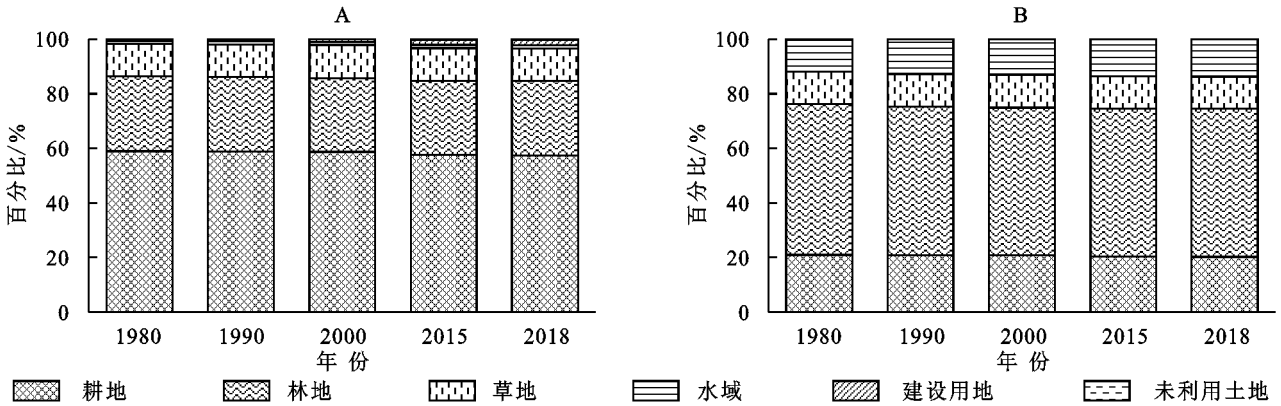


图 4 1980—2018 年涪江流域土地利用类型面积结构(A)以及生态系统服务价值结构(B)

3.3 涪江流域 1980—2018 年 ESV 空间变化分析

3.3.1 网格视角下 ESV 空间分析 研究分别基于 5 个时期 1 600 个评价单元格计算单位面积 ESV,在 ArcGIS 10.2 软件中利用克里格插值法 (Ordinary Kriging) 进行空间插值,根据单位网格 ESV 状况,将研究区各评价单元划分为 5 个等级:低( $\leq 0.2$ )、较低( $0.2, 0.4]$ 、中( $0.4, 0.6]$ 、较高( $0.6, 0.8]$ 、高( $> 0.8$ ) (单位,亿元),得到 1980—2018 年流域 ESV 空间格局分布图(图 5),发现 1980—2018 年涪江流域 ESV 空间分布差异明显。总体表现为上游高中下游低,同

时下游地区大致呈现出 ESV 由中部向东西两侧递减趋势。流域北部上游高 ESV 地区以高价值和较高价值为主,主要得益于区域地势较高,人类活动较少,林地分布广,生态保育较好。中下游中部以中价值为主,其中在绵阳、梓潼和三台县附近出现较低价值区,蓬溪、遂宁和射洪县出现较高价值区,并且在研究期间,较低价值区面积减少,1990 年以后较高价值区中部出现高价值区,表明中下游沿河区域生态向好发展。流域中下游西南部主要以较低价值和低价值分布为主,在流域未来开发中需加强生态建设。

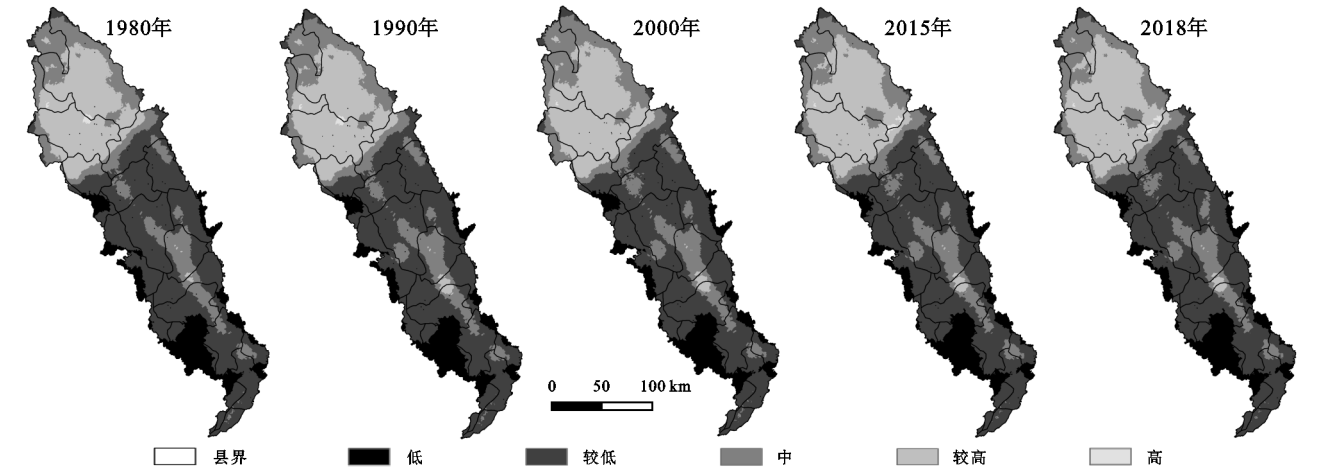


图 5 涪江流域 1980—2018 年生态系统服务价值空间分布

3.3.2 县域视角下 ESV 空间分析 网格尺度 ESV 分布可以反映整个流域 ESV 空间分布和变化状况,但县市级 ESV 等级面积及其占比无法明晰,为进一步探究流域 ESV 的空间分布格局,运用 ArcGIS 叠加处理以及数据分析模块,得到研究区各主要县市级行政区各等级面积占比见图 6,流域各县主要以较低价值分布为主,虽然流域整体 ESV 处于增加态势,但各县市 ESV 变化趋势不同,这是价值增减在一定程度上相互抵消的结果。从各县市等级占比情况看,北川县、平武县、松潘县和安县整体以较高和高价值占比为主,以上四县均位于流域上游,是林地和草地的主要所在地,高森林覆盖率、优良的生态环境使得该县市高价值区占比高,生态效益好。安岳县、合川市、大足县、潼南县、铜梁县、中江县和遂宁县低价值分布占比高,盐亭县和梓潼县区域内以较低价值为主,没有较高价值区域,以上县市均位于流域中下游,地势较为平坦,是主要的人类活动区、耕作区,耕地面积占比大,从而降低了这些县市的 ESV,这也反映出流域中下游县市境内可提供的生态价值低,生态空间相对较少,下一步应合理配置土地资源,以维持区域生态安全。

3.4 涪江流域生态系统服务价值模拟预测

3.4.1 2030 年多情景土地利用结构模拟分析 基于

4 种发展情景的设定,模拟 2030 年土地利用分布,通过 ArcGIS 空间模块得到 4 种情景模拟下 2030 年土地结构(表 8)。自然发展情景下,2030 年的模拟耕地和草地面积相较于 2015 年减少了 297.65 km<sup>2</sup>, 98.93 km<sup>2</sup>;建设用地面积扩张迅速,增加了 330.09 km<sup>2</sup>,增幅 47.91%。林地、水域与未利用土地分别增加了 13.71 km<sup>2</sup>, 22.10 km<sup>2</sup>, 38.50 km<sup>2</sup>,面积变化较小。耕地安全情景下,耕地面积大幅扩张,增加了 1 312.77 km<sup>2</sup>,面积占比增幅 6.37%。此外除建设用地面积略有增加,增加了 33.58 km<sup>2</sup>,林地、草地、水域和未利用土地分别减少了 660.58 km<sup>2</sup>, 609.66 km<sup>2</sup>, 46.49 km<sup>2</sup>, 21.79 km<sup>2</sup>。生态保护情景下,保护生态用地(即林地、水域和草地)是最主要的目标,因而 2030 年的模拟林地面积增加了 570.27 km<sup>2</sup>,草地和水域分别增加了 87.67 km<sup>2</sup>, 27.50 km<sup>2</sup>,建设用地面积亦增加了 78.17 km<sup>2</sup>。在此阶段,生态用地的增加主要来自与耕地和未利用土地的转入,分别减少了 726.12 km<sup>2</sup>, 29.66 km<sup>2</sup>。快速发展情景下,建设用地的扩张是经济快速发展的基本标志,建设用地面积增加了 94.20 km<sup>2</sup>,同时,耕地面积增加了 1 230.07 km<sup>2</sup>,增加主要来自于草地的转出,草地减少了 1 218.96 km<sup>2</sup>。



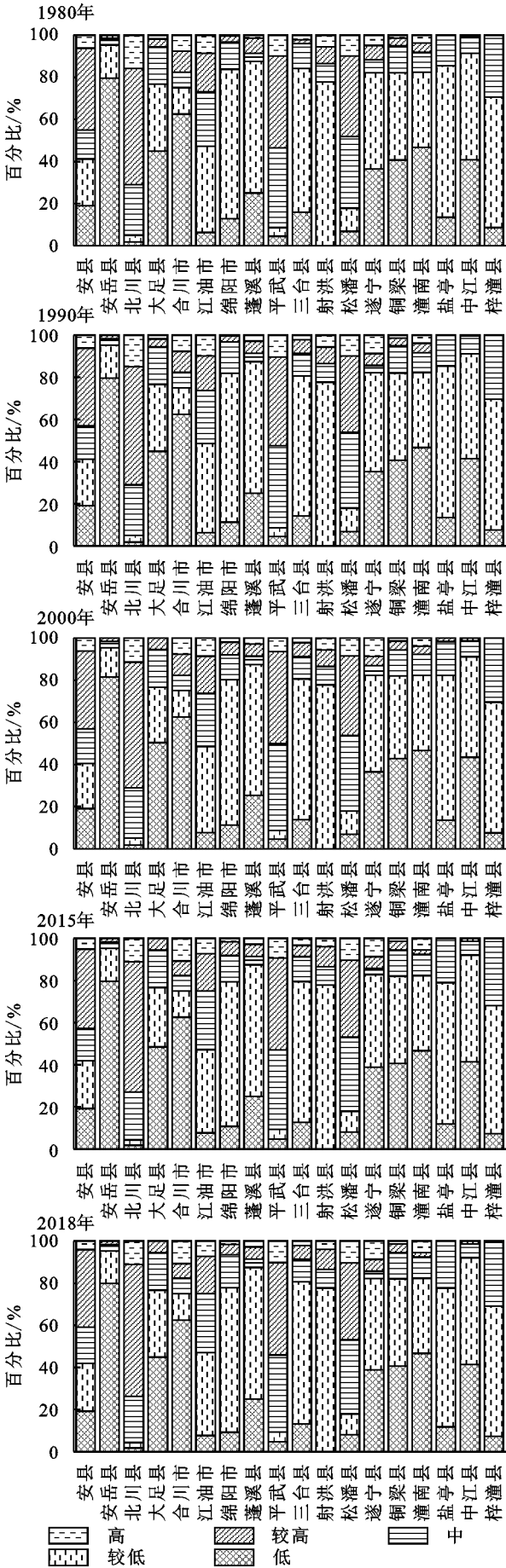


图 6 1980—2018 年涪江流域县域视角各等级 ESV 面积占比

3.4.2 2030 年多情景 ESV 模拟分析 从流域整体生态系统服务价值(表 9)发现,4 种发展情景提供的 ESV 变化不同,与 2015 年 ESV 相比,自然发展情景的 ESV 为 784.80 亿元,增加了 1.44 亿元;耕地安全情景下 ESV 为 740.31 亿元,减少了 43.05 亿元;生态保护情景的 ESV 最高,服务价值 811.09 亿元,增加了 27.74 亿元;快速发展情景下 ESV 为 751.40 亿元,减少了 31.96 亿元。自然发展情景下,调节功能将继续发挥优势,增加了 2.27 亿元,各地类的 ESV 占比变化(图 7)显示,水域提供的 ESV 增加了 5.28 亿元,耕地和草地减少了 4.45 亿元,这一阶段水域成为维持流域生态服务供给的主要土地类型。耕地安全情景下,研究区土地生态系统提供各种服务的能力大幅降低,供给服务、调节服务、支持服务和文化服务分别减少了 1.98 亿元、31.4 亿元、7.68 亿元和 1.98 亿元。生态保护情景下,服务价值变化表现出与耕地安全情景下相反的趋势,供给服务、调节服务、支持服务和文化服务分别增加了 1.29 亿元、20.21 亿元、4.99 亿元和 1.24 亿元。

除耕地服务价值减少外,林地、草地和水域分别增加了 24.88 亿元、1.91 亿元和 6.57 亿元,这表明以发展耕地侵占生态用地的模式会损害生态服务能力,抚育和发展生态用地对流域生态安全具有重大意义。快速发展情景下,食物生产服务和维持养分循环服务价值分别增加了 1.80 亿元和 0.08 亿元,供给服务、调节服务、支持服务和文化服务总体呈减少趋势,分别减少了亿元 1.59,24.68 亿元、4.35 亿元和 1.33 亿元。各地类的服务价值占比变化中,耕地和林地的 ESV 分别增加了 9.50 亿元和 0.98 亿元,而草地和水域服务价值分别减少了 26.49 亿元和 15.92 亿元,建设用地的快速扩张侵占生态用地,导致流域提供各项生态服务功能的能力降低。

## 4 讨论

涪江流域是长江上游水土流失较为严重的地区之一,是典型的生态敏感脆弱区,目前缺少对于涪江流域土地结构和 ESV 变化研究以及多情景模拟下演变趋势的探究,因而研究对与涪江流域和长江上游生态屏障建设具有重要意义。本研究结果发现,各土地利用类型的贡献顺序为:林地>耕地>水域>草地>未利用土地,其中,流域林地提供的生态系统价值最高,占到流域总生态服务价值的 54%~55%。熊鹰<sup>[22]</sup>在四川省开展的农业生态系统服务价值研究表明,林地在四川省农业生态系统服务价值中所占比重



最大,这与本文研究结果一致。本文通过对 1980—2018 年土地利用类型面积结构变化和生态系统服务价值变化类比发现,变化呈正比关系,左玲丽等<sup>[23]</sup>在对岷江流域开展的 ESV 研究结果显示,土地利用的变化会导致 ESV 的协同变化,与本文研究结果亦具有一致性。同时,在未来模拟情景中,耕地安全情景和快速发展情景提供的生态系统服务价值较 2015 年分别减少了 43.05 亿元和 31.96 亿元。左玲丽等<sup>[23]</sup>研究显示以耕作和城市化等人类活动为主导的土地利用方式导致区域生态服务价值变化呈现减少趋势,亦印证了本研究结论。因此,建议通过制定流域空间

规划,加强生态用地的保护与抚育,将生态空间修复与生态格局规划纳入流域未来开发建设过程,根据 2016 年国务院批准发布的《关于扩大新一轮退耕还林还草规模的通知》,继续落实在耕地保有量基础上为新一轮退耕还林创造条件。

本文基于 GeoSOS-FLUS 对涪江流域未来土地利用状况进行多情景预测,在模型模拟过程中,选取 8 个驱动因素,同时基于 2015 年模拟结果经过多次测试邻域因子获取较为准确的模拟参数,以提高模型的准确性。但由于实际中土地利用变化的复杂性,仍有部分要素(如气候和水文因素)未考虑,在今后将进一步研究。

表 8 2030 年多情景模拟下涪江流域各土地利用类型面积

类型	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用土地	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
自然发展情景	20317.43	56.75	9745.83	27.18	4148.03	11.56	470.84	1.31	1019.04	2.84	102.47	0.29
耕地安全情景	21927.85	61.24	9071.54	25.29	3637.30	10.13	402.25	1.12	722.54	2.01	42.18	0.12
生态保护情景	19888.96	55.55	10302.39	28.73	4334.63	12.08	476.24	1.33	767.13	2.14	34.32	0.10
快速发展情景	21845.15	61.01	9754.49	27.20	3028.00	8.44	382.07	1.06	783.16	2.18	10.80	0.03

表 9 2030 年多情景模拟下涪江流域生态系统服务价值

亿元

情景	供给服务				调节服务					支持服务	文化服务	总计
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观	
自然发展情景	47.43	26.38	−15.66	81.61	163.01	53.43	239.73	87.16	10.20	63.04	28.47	784.80
耕地安全情景	49.88	26.08	−19.79	80.14	152.77	49.63	221.57	84.37	10.27	58.87	26.53	740.31
生态保护情景	46.98	26.96	−14.50	83.65	170.63	55.77	245.67	89.91	10.33	65.94	29.75	811.09
快速发展情景	49.81	26.50	−19.75	81.47	157.55	50.74	221.07	86.06	10.38	60.40	27.18	751.40

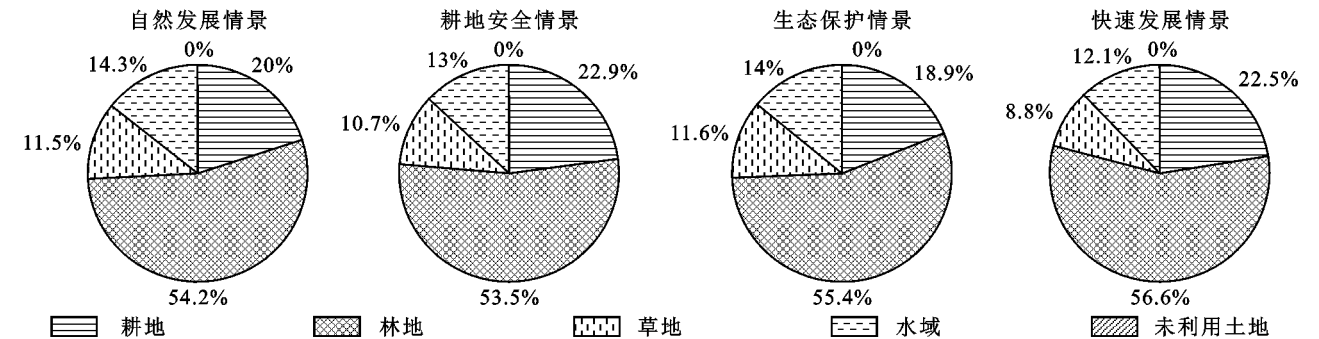


图 7 2030 年多情景模拟下涪江流域生态系统服务价值结构

## 5 结论

研究区土地利用以耕地和林地为主。1980—2018 年耕地面积持续减少,林地波动中减少,建设用地、水域和未利用土地面积在研究期内持续增加,其中建设用地扩张迅速,动态度 6.72%。

涪江流域生态系统服务价值在研究期内总体呈上升趋势,各土地利用类型的贡献顺序为:林地>耕地>水域>草地>未利用土地,其中林地和水域提供的生态

系统服务价值贡献率极高。水文调节、气候调节、土壤保持和气体调节服务在流域生态系统中发挥主要作用,调节服务是在流域生态系统中的主体功能,同时在研究期间增加了 8.30 亿元,贡献率 115.44%。

从整体空间分布来看,38 a 来流域生态系统服务价值总体上游高中下游低,同时下游地区大致呈现出 ESV 由中部向东西两侧递减趋势,流域西南部是流域的低生态价值区,需要在流域开发过程中重点关注。从县域视角出发,北川县、平武县、松潘县和安县

高价值占比高,县域内生态格局安全。安岳县、合川市、大足县等县市内低价值和较低价值占比高,可提供的生态价值低,生态安全有待提高。

生态保护情景下 ESV 增加了 27.74 亿元,各项服务呈现向好趋势,而在耕地安全情景和快速发展情景下,流域内各项生态服务功能不能维持目前提供生态服务的水平,除食物生产以及维持养分循环外,提供生态服务的能力均呈现减少趋势,这表明在未来开发建设的过程中,要注重保护和开发生态用地,才能维持流域提供生态价值的能力。

#### 参考文献:

- [1] Arias-Arévalo P, Martín-López B, Gómez-Baggethun E. Exploring intrinsic, instrumental, and relational values for sustainable management of social-ecological systems [J]. *Ecology and Society*, 2017, 22(4), <https://www.jstor.org/stable/26799016>.
- [2] Costanza R, Arge A, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1997, 25:3-15.
- [3] Song W, Deng X. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576:705-719.
- [4] 巩杰,徐彩仙,燕玲玲,等.1997—2018 年生态系统服务研究热点变化与动向[J].*应用生态学报*, 2019, 30(10): 3265-3276.
- [5] 谢高地,鲁春霞,成升魁.全球生态系统服务价值评估研究进展[J].*资源科学*, 2001, 23(6):5-9.
- [6] 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.
- [7] Xing L, Zhu Y, Wang J. Spatial spillover effects of urbanization on ecosystem services value in Chinese cities[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121:107028.
- [8] Shao X, Jing C, Qi J, et al. Impacts of land use and planning on island ecosystem service values: a case study of Dinghai District on Zhoushan Archipelago, China[J]. *Ecological Processes*, 2017, 6(1):1-11.
- [9] Beaumont N, Austen M, Atkins J, et al. Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(3):253-265.
- [10] Wu S, Yan X, Zhang L. The relationship between forest ecosystem emergy and forest ecosystem service value in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3):334-342.
- [11] 李辉,周启刚,李斌,等.近 30 年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J].*长江流域资源与环境*, 2021, 30(3):654-666.
- [12] 游惠明,韩建亮,潘德灼,等.泉州湾河口湿地生态系统服务价值的动态评价及驱动力分析[J].*应用生态学报*, 2019, 30(12):4286-4292.
- [13] Sannigrahi S, Bhatt S, Rahmat S, et al. Estimating global ecosystem service values and its response to land surface dynamics during 1995—2015 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223:115-131.
- [14] 许丁雪,吴芳,何立环,等.土地利用变化对生态系统服务的影响:以张家口—承德地区为例[J].*生态学报*, 2019, 39(20):7493-7501.
- [15] Tan Z, Guan Q, Lin J, et al. The response and simulation of ecosystem services value to land use/land cover in an oasis, Northwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 118:106711.
- [16] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168:94-116.
- [17] 张杰,周寅康,李仁强,等.土地利用/覆盖变化空间直观模拟精度检验与不确定性分析:以北京都市区为例[J].*中国科学(D辑:地球科学)*, 2009, 39(11):1560-1569.
- [18] 刘小平,黎夏,叶嘉安,等.利用蚁群智能挖掘地理元胞自动机的转换规则[J].*中国科学 D 辑:地球科学*, 2007, 37(6):824-834.
- [19] 王旭,马博文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].*自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242.
- [20] Huang Y, Huang J L, Liao T J, et al. Simulating urban expansion and its impact on functional connectivity in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643:1553-1561.
- [21] Liang X, Liu X, Li X, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177:47-63.
- [22] 熊鹰.基于价值当量因子分析的四川省农业生态系统服务价值评价研究[J].*中国农学通报*, 2021, 37(2): 154-160.
- [23] 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研究[J].*生态学报*, 2021, 41(16):6384-6397.