

DOI: 10.5846/stxb202007021722

左玲丽, 彭文甫, 陶帅, 祝聪, 徐新良. 岷江上游土地利用与生态系统服务价值的动态变化. 生态学报, 2021, 41(16): 6384-6397.

Zuo L L, Peng W F, Tao S, Zhu C, Xu X L. Dynamic changes of land use and ecosystem services value in the upper reaches of the Minjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6384-6397.

岷江上游土地利用与生态系统服务价值的动态变化

左玲丽^{1,2}, 彭文甫^{1,2,*}, 陶 帅^{1,2}, 祝 聪³, 徐新良⁴

1 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610068

2 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610068

3 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

4 中国科学院资源环境科学数据中心, 北京 100101

摘要:岷江上游是中国西南典型生态脆弱区之一, 研究岷江上游土地利用与生态系统服务价值(Ecosystem Services Values, ESV)的动态变化, 对区域生态保护, 实现可持续发展具有重要意义。基于岷江上游 2000、2005、2010 和 2015 年四期遥感解译数据, 利用 CA-Markov 模型预测了 2035 年土地利用格局, 并引入空间异质系数、社会经济调整系数和资源稀缺系数对生态系统服务价值进行修正, 构建适用于研究区的 ESV 评估模型, 分析了岷江上游 2000—2035 年土地利用及 ESV 的时空动态变化。结果表明: 1) 岷江上游土地利用类型以林地和草地为主。建设用地和耕地面积持续增加, 草地、水域和未利用地呈现波动变化; 2) 2015—2035 年和 2000—2015 年相比, ESV 增幅下降, 土地提供生态系统服务的能力有所降低。维持生物多样性、保持土壤、气体调节、水文调节和气候调节是岷江上游生态系统的主要功能; 3) 岷江上游中东部及河谷地带是 ESV 低值及损失冷点集中区, 西部地区是 ESV 高值及增加热点集中区; 4) ESV 对系数缺乏弹性, 林地和草地面积的变化是引起生态系统服务价值变化的主要敏感因子。研究结果对研究区土地利用格局优化以及推行生态文明建设具有重要参考意义。

关键词:土地利用; 生态系统服务价值; CA-Markov 模型; 岷江上游

Dynamic changes of land use and ecosystem services value in the upper reaches of the Minjiang River

ZUO Lingli^{1,2}, PENG Wenfu^{1,2,*}, TAO Shuai^{1,2}, ZHU Cong³, XU Xinliang⁴

1 The Institute of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

2 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring of Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

3 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

4 Data Center for Resources and Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The upper reaches of the Minjiang River (URMR) are one of the typical ecologically fragile areas in southwest China. Studying the dynamic changes of land use pattern and the ecosystem service values (ESV) in the URMR is highly significant for the ecological protection and sustainable development of the region. Based on four phases of remote sensing data obtained during 2000, 2005, 2010, and 2015 in URMR, we predicted the land use pattern in 2035 by using the CA-Markov model. The ecosystem service value was revised by introducing the coefficients of spatial heterogeneity, socioeconomic adjustment, and resource scarcity. Subsequently, an ESV evaluation model for the study area was developed. The spatiotemporal changes in land use and ESV in the URMR were analysed for the period 2000 to 2035. The results indicate that: 1) the two main types of land use in the URMR are forest and grassland. The area of construction land and

基金项目:教育部人文社科基金项目(17YJA850007);国家自然科学基金项目(41371125);四川省应用基础研究项目(2017JY0155)

收稿日期:2020-07-02; **网络出版日期:**2021-05-21

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

cultivated land exhibited an increasing trend, whereas grassland, water bodies, and unutilized land showed fluctuations. 2) Compared with the period 2000 - 2015, the growth rate of ESV and the ability of land to sustain ecological services declined in 2015—2035. The maintenance of biodiversity and soil, and the regulation of gas, hydrology, and climate were found to be the main functions of the ecosystem in the URM. 3) Cold spots with ESV loss and low ESV were concentrated in the middle-eastern part of the URM and the valley area, whereas hot spots with ESV increment and high ESV were concentrated in the western area. 4) ESV was relatively inelastic with respect to the coefficient, and changes in forest and grassland areas were the most sensitive factors that generate changes in the ecosystem service values. Our results have significant importance for realizing a reasonable land use pattern of the study area that facilitates the construction of an ecological civilisation.

Key Words: land use; ecosystem services value; CA-Markov; upper reaches of Minjiang River

生态系统服务是指生物体从维持地球生命支持的生态系统中获得的利益^[1],其可持续供给是经济社会可持续发展的基础^[2]。生态系统服务价值(Ecosystem Services Values, ESV)作为评价区域生态系统服务强弱的一种方法^[3],开展 ESV 的科学评估并对其时空演化特征进行定量描述,对区域制定合理的生态保护政策具有重要的意义^[4]。土地利用/覆被变化是人类活动与自然环境相互作用最直接的表现形式^[5],是引起全球环境变化的重要因素^[6]。土地利用变化影响生态系统格局与过程,改变着生态系统提供产品与服务的能力^[7],从而影响着 ESV 的变化。近年来,随着 3S 技术的发展及运用,土地利用变化与生态系统服务价值的影响研究成为热点。

自 Costanza 等^[8]实现了全球 ESV 的量化后,掀起了 ESV 估算热潮^[9]。国内,谢高地等^[10-11]基于 Costanza 等^[8]研究建立了中国生态系统单位面积服务价值当量表,并被国内学者广泛使用。由于生态系统存在异质性和复杂性,直接引用当量因子法或者只考虑 ESV 的静态估算价值,将难以完全解释区域 ESV 的动态变化^[12]。因此,修正当量表与研究区当量表之间的差异成为了研究热点。目前,有学者在对谢高地等制定的当量因子进行修正的基础上开展了区域 ESV 的研究。如姜栋栋等^[13]利用植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)进行区域修正;王永琪等^[14]利用谢高地等制作的生物量因子表进行修正;刘倩等^[15]采用区域差异系数、社会发展系数进行调整;雷军成等^[16]利用植被覆盖度指数进行修正;谢高地等^[17]、潘洪义等^[12]利用净初级生产力、降水量、土壤保持量数据计算其调整系数。但在修正过程中,同时考虑自然和社会经济因素对 ESV 的影响仍然关注较少。随着 ESV 研究的不断深入,针对不同的空间尺度(行政区域、流域等)、生态系统(森林、河流、草地等)以及功能都有了大量研究^[18],但鲜有专门针对山地等典型地区的研究,尤其是我国西南生态环境脆弱山区 ESV 的时空分布特征及演变趋势仍难以完全被表征。

岷江上游地处我国地形阶梯中第一级阶梯与第二级阶梯过渡地带^[19],是重要的生态屏障区、生物多样性区和典型生态环境脆弱区。除此之外,岷江上游也是集资源供给、生态服务、环境调节等多种功能与经济社会发展于一体的复杂系统,对整个岷江流域乃至长江上游地区的生态平衡具有重要意义^[20]。鉴于上述情况,利用空间异质系数、社会经济调整系数、资源稀缺系数对当量进行修正,构建了更能反映研究区实际情况的 ESV 模型。且基于遥感解译的 2000—2015 年土地利用数据,利用 CA-Markov 模型预测了 2035 年岷江上游土地利用格局,进一步分析岷江上游土地利用与生态系统服务价值的时空演变趋势,为区域可持续发展提供科学依据。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

岷江上游介于 102°32'—104°15'E, 30°45'—33°09'N 之间,位于四川西北部,地处我国青藏高原东麓、横断山脉北端与川西北高山峡谷东侧的结合部(图 1)^[20]。地形结构复杂,以高山峡谷地貌为主,河谷深切,山

高坡陡。区域内多地震、滑坡、泥石流等自然灾害,生态环境极其脆弱。该区域是长江上游生态保护屏障的重要组成部分,也是成都平原生态保护的生命线^[20]。岷江上游流经的行政区域大部分在阿坝藏族羌族自治州,主要包括茂县、松潘、汶川、理县和黑水五县,面积 24741.05 km²。根据阿坝州 2016 年年鉴,2015 年岷江上游总人口约为 39.01×10⁴人,其中农业人口约 28.77×10⁴人,非农业人口约 10.24×10⁴人。区域内地广人稀,羌、藏、回等少数民族聚居,是民族迁移的“走廊”和交汇地带^[21]。地区经济发展整体落后,是中国传统农耕文化区向游牧文化区的交汇面^[21]。

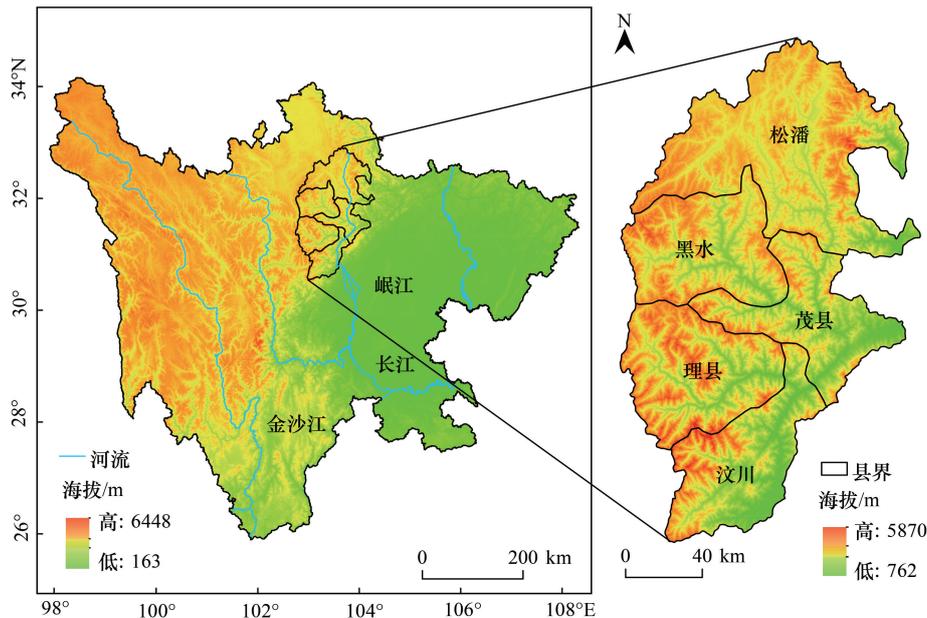


图1 岷江上游地理位置

Fig.1 The geographical position of the upper reaches of the Minjiang River

1.2 数据来源与处理

岷江上游 2000、2005、2010 和 2015 年的四期遥感影像来源于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>)。选取了云量最少的 5—9 月份的 Landsat5/7 和 Landsat 8 遥感影像数据为数据源,轨道号为 130/37、130/38 和 130/39。参考中国科学院的土地利用和覆被变化分类方法,结合岷江上游实际情况,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。利用 ENVI 软件进行预处理,具体步骤包括:几何纠正、图像拼接和裁剪等。再通过目视解译,得到四期岷江上游土地利用分类图,经过随机抽样检查 Kappa 检验精度达到 96% 以上。

生态系统服务价值估算所用到的耕地面积、粮食作物产量、CPI 和修正系数计算所需要的社会经济数据来源于全国和地方统计年鉴以及国民经济和社会发展公报 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>)。2015 年粮食平均收购价来源于《中国粮食年鉴》,NPP 计算所需要的全国和地方的降水 and 气温资料来源于中国国家气象信息中心和中国环境状况公报以及水资源公报。驱动因子数据来源于资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)、地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 和 OSM (<https://www.openstreetmap.org>)。

2 研究方法

2.1 土地利用变化特征分析

土地利用变化幅度指各土地利用类型的面积在数量上的变化,有助于了解研究区土地利用面积的变化趋势^[22]。计算公式如下:

$$J = \frac{U_b - U_a}{T} \quad (1)$$

式中, J 为研究期某种土地利用类型的年变化量(hm^2); U_a 和 U_b 分别为研究期初和研究期末某种土地利用类型的面积(hm^2); T 为年数。

土地利用转移图谱,利用 ArcGIS 空间分析模块中地图代数叠加运算,可以反映不同时期土地利用类型转换情况。计算公式如下:

$$Y = 10 \times P + Q \quad (2)$$

式中, Y 为土地利用图谱单元类型; P 为前期的土地利用类型; Q 为后期的土地利用类型。从而生成两个年份间的土地利用转移图谱。

2.2 生态系统服务价值评估

依据 Costanza 等^[8]的研究结果,生态系统服务可分为 9 种^[10]。本文参考谢高地等 2007 年修订的“中国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表”^[10]。由于谢高地等人的研究是基于全国生态系统的平均水平,未能有效反映生态系统的空间异质性、生态系统资源和服务功能的区域稀缺性与需求性^[23]、区域社会经济发展水平的不均衡性。因此,本文参考已有研究^[24-25],并结合研究区域的实际情况,通过空间异质系数、资源稀缺系数和社会经济调整系数进行修正。

2.2.1 单位面积生态系统服务的经济价值确定

参考谢高地等^[26]的研究,单位面积农田食物生产生态系统服务价值(1 个标准当量因子)相当于全国平均粮食单产市场价值的 1/7。计算公式如下:

$$E = \frac{1}{7} \times \frac{M}{H} \quad (3)$$

式中, E 为单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值(元/ hm^2); M 为研究区每年的粮食总价值(元); H 为研究区耕地面积(hm^2)。

为了减少不同年份物价差异带来的影响,以 2015 年粮食平均收购价为基准,运用 CPI 指数对不同年份价值进行修正。

$$VC = X_{ij} \times E \quad (4)$$

式中, VC 为生态系统服务价值系数(元/ hm^2); X_{ij} 为*i*类生态系统第*j*类生态系统服务的当量因子。耕地、林地、草地、水域、未利用地的价值系数参考谢高地的当量因子表计算,耕地对应农田、林地对应森林、草地对应草地、水域对应河流/湖泊、未利用地对应荒漠。建设用地参考文献取值^[27]。

2.2.2 生态系统服务价值系数修正

(1) 空间异质性修正

生态系统服务的强弱直接影响生态系统服务价值,而生态系统服务与生物量有着密切联系^[26]。一般情况,生物量越大,生态系统服务也就越强^[28]。因此,本文用 NPP 反映生物量并作为空间异质系数进行修正^[15]。生产力的计算要考虑到数据获取难易程度且又能说明变化,本文选用 Thornthwaite Memorial 模型^[29]。计算公式如下:

$$N = \frac{\text{NPP}'}{\text{NPP}''} \quad (5)$$

$$\text{NPP} = 3000 \times [1 - e^{-0.0009695 \times (V-20)}] \quad (6)$$

$$V = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05r}{L}\right)^2}} \quad (7)$$

$$L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3 \quad (8)$$

式中, N 表示空间异质系数; NPP 表示植被净初级生产力 ($\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); NPP' 表示研究区植被净初级生产力; NPP'' 表示全国植被净初级生产力; V 表示实际蒸散量 (mm); r 为年降水量 (mm); L 为平均蒸发量 (mm); T 为年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

(2) 社会经济因素修正

各地区的自然和社会经济条件存在差异, 导致社会经济发展水平和生态系统服务以及人们对生态系统服务价值的认知具有差异性^[30]。因此, 本文从支付意愿和支付能力两个方面对生态系统服务价值系数进行修正。计算公式如下:

$$D = R \times W \quad (9)$$

式中, D 为社会经济调整系数; R 为 ESV 的支付意愿; W 为居民对 ESV 的支付能力。

居民的支付意愿会随着社会经济发展水平发生变化。利用皮尔生长曲线模型可以表示社会发展水平^[31]。计算公式如下:

$$R = \frac{Z'_m}{Z'_g} \quad (10)$$

$$Z = \frac{1}{1 + e^{3 - \frac{1}{E'_n}}} \times \frac{h}{H} \quad (11)$$

$$E'_n = E_a \times P_a + E_b \times P_b \quad (12)$$

式中, Z 表示社会发展水平; Z'_m 、 Z'_g 分别表示研究区、全国社会发展水平; E'_n 为恩格尔系数; E_a 、 E_b 分别为城镇、农村恩格尔系数; P_a 、 P_b 分别为城镇、农村人口在总人口的比重; h 、 H 为研究区、全国城市化水平。

支付能力是个人或者国家经济能力的表现^[32]。利用研究区和全国人均国内生产总值的比值进行 ESV 支付能力修正。计算公式如下:

$$W = \frac{\text{GDP}'}{\text{GDP}''} \quad (13)$$

式中, GDP' 表示研究区人均国内生产总值; GDP'' 表示全国人均国内生产总值。

(3) 资源稀缺性修正

区域的人口越多, 人口密度越大, 人们对于资源的需求也就会越大。因此, 利用人口密度反映系数修正^[33]。计算公式如下:

$$F = \frac{\ln g}{\ln G} \quad (14)$$

式中, F 表示岷江上游资源稀缺系数; g 为岷江上游的人口密度; G 为全国人口密度。

综上, 2000—2015 年的生态系统服务价值调整系数见表 1。

表 1 生态系统服务价值调整系数

Table 1 Ecosystem service value adjustment coefficient

调整系数 Adjustment coefficient	2000	2005	2010	2015
社会经济调整系数 Socio-economic adjustment coefficient	0.419	0.496	0.472	0.464
资源稀缺系数 Resource scarcity factor	0.559	0.561	0.558	0.556
空间异质系数 spatial heterogeneity coefficient	0.845	1.002	0.977	1.072

修正后的生态系统服务价值计算公式如下:

$$\text{ESV} = \sum (A \times VC \times N \times D \times F) \quad (15)$$

式中, ESV 生态系统服务价值 (元); A 为各类土地利用类型的面积 (hm^2); VC 年份生态系统服务价值系数

(元/hm²); N 空间异质系数; D 社会经济调整系数; F 资源稀缺系数。

2.3 生态系统服务价值的敏感性分析

对敏感性进行分析的目的是确定时间变化后价值系数对生态系统服务价值的影响程度。计算公式如下:

$$CS = \frac{(ESV_{mk} - ESV_{nk}) / ESV_{nk}}{(VC_{mk} - VC_{nk}) / VC_{nk}} \quad (16)$$

式中, CS 是敏感性指数; VC_{nk} 和 VC_{mk} 分别为调整前后 k 地类的生态系统服务价值系数(元/hm²); ESV_{nk} 和 ESV_{mk} 分别为调整前后 k 地类的生态系统服务价值(元)。

若 $CS < 1$, 说明 ESV 对 VC 不敏感, 缺乏弹性, 即结合区域特征修正后的 ESV 是合理^[34]。

2.4 土地利用变化模拟

元胞自动机(Cellular Automata, CA)是一种基于不连续的时空动力学模型,其特点是时间、空间和状态都是离散的,具有强大的空间运算能力,可以有效地模拟系统的空间变化^[35-36]。其模型可表示为:

$$S_{(t+1)} = f[S_{(t)}, U] \quad (17)$$

式中, S 为元胞有限、离散的状态集合; U 为元胞的邻域; t 和 $t+1$ 表示不同的时刻; f 为局部空间元胞状态的转化规则。

马尔科夫(Markov)模型,是根据马尔科夫随机过程理论形成的方法,研究和分析随机事件的变化规律,并预测未来变化^[37]。其模型可表示为:

$$S_{(t+1)} = S_t \times Z_{ij} \quad (18)$$

式中, S_t 和 S_{t+1} 为该时刻土地利用系统的状态; Z_{ij} 为状态转移矩阵。

CA-Markov 模型综合了 CA 模型所具有的空间动态演化优势及 Markov 模型的长期预测优势,可以有效地表现土地利用时间和空间的变化情况^[38]。

3 结果分析

3.1 土地利用变化

3.1.1 模拟验证

本文利用 CA-Markov 模型,对耕地、建设用地进行限制,选用地貌、气象、距离因素作为影响土地利用变化的驱动因素,包括海拔、坡度、降水、气温、GDP、人口、河流距离、道路距离和中心城镇距离,制作适宜性图集并对土地利用格局进行预测。为了验证 CA-Markov 的准确性,以 2010 年为基年,预测了岷江上游 2015 年土地利用格局,并与实际解译的 2015 年土地利用状态进行比较,结果见图 2。检验得出,总体 Kappa 指数为 0.9462,随机指数为 0.9578、位置指数为 0.9543、分层区位指数为 0.9543,说明预测结果可信度较高。通过检验后,以 2015 年为基年,迭代次数为 20,选择 5×5 连续性滤波器,模拟 2035 年岷江上游土地利用格局(图 3)。

3.1.2 土地利用类型面积变化

由表 2 和图 3 可知,岷江上游土地利用类型以林地和草地为主,建设用地和未利用地面积最少。2000—2015 年林地面积持续减少,年均下降 438.738 hm²,2015—2035 年林地面积年均增加 8 593.691 hm²。建设用地和耕地面积持续增加,尤其是耕地在 2015—2035 年年均增加了 2456.901 hm²。草地、水域和未利用地面积呈现波动变化,2000—2015 年草地面积年均增加 33.906 hm²,但在 2015—2035 年大幅度下降,年均下降 11066.008 hm²。水域和未利用地在 2010—2015 年均分别下降 59.706 hm²和 40.554 hm²,在 2015—2035 年下降 81.729 hm²和 0.810hm²。

3.1.3 土地利用转移图谱分析

由图 4 可知,林地和草地在与其它土地类型转换中较为剧烈。2000—2015 年林地转出到草地、耕地面积较大。建设用地的增加主要来源于林地和耕地的转入,耕地的增加主要来源于林地和草地的转入。因此,这一阶段主要是林地面积在减少。未利用地的增加主要来源于林地和草地的转入,说明区域的林地和草地在一

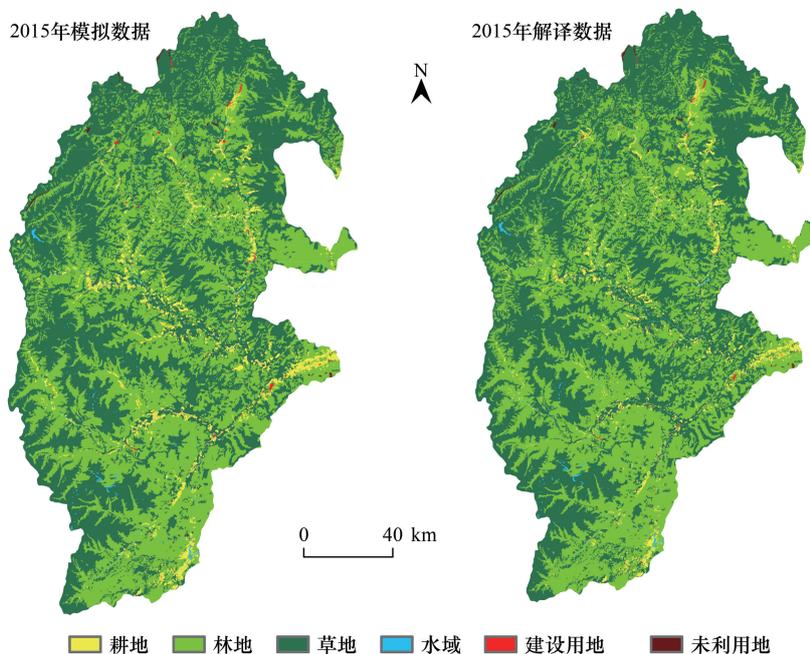


图 2 2015 年模拟和解译土地利用图

Fig.2 Simulated and interpreted land use in 2015

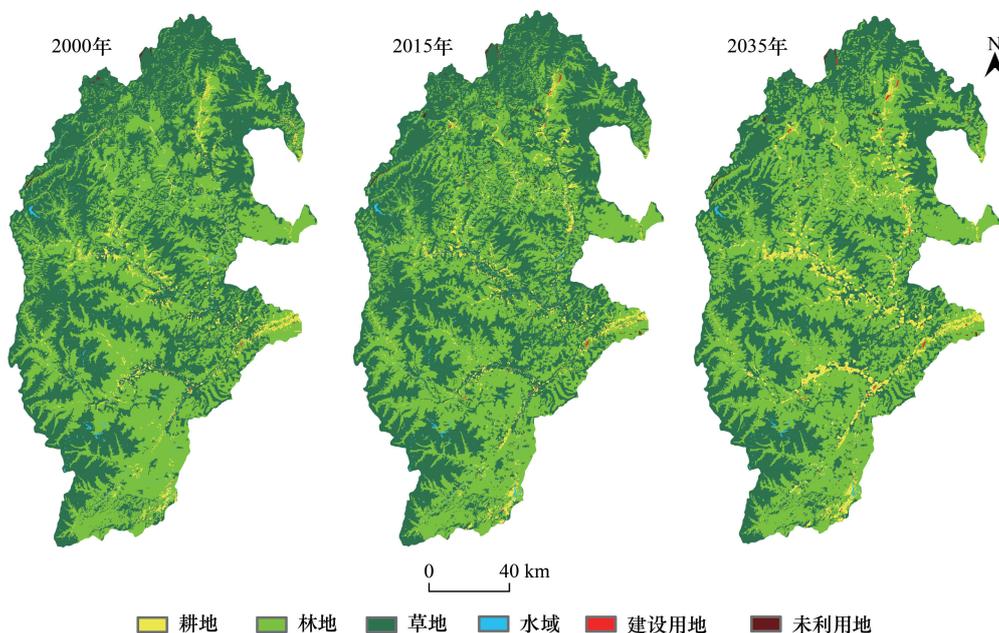


图 3 岷江上游 2000—2035 土地利用变化

Fig.3 Land use change in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

定程度上出现退化的现象。从空间上看,林地转耕地和耕地转建设用地主要分布在松潘县和汶川县东部,林地转草地主要分布在松潘和黑水县,林地转建设用地和草地转耕地主要分布在松潘和茂县。草地和林地转未利用地主要分布在松潘县。

表 2 岷江上游 2000—2035 年土地利用变化/hm²

Table 2 Land use change in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

年份 Year	土地利用类型 Land use types					
	耕地 Cultivated land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land
2000	66950.280	1166481.720	1226406.600	11758.320	1068.660	1440.000
2005	67329.000	1163250.990	1227168.090	12114.540	1806.210	2436.750
2010	67391.370	1161583.650	1226383.290	12256.830	2710.890	3779.190
2015	69011.730	1159900.650	1226915.190	11958.300	2745.630	3576.420
2035	118149.750	1331774.460	1005595.020	10323.720	4414.230	3560.220
2000—2005	75.744	-646.146	152.298	71.244	147.510	199.350
2005—2010	12.474	-333.468	-156.960	28.458	180.936	268.488
2010—2015	324.072	-336.600	106.380	-59.706	6.948	-40.554
2000—2015	137.430	-438.738	33.906	13.332	111.798	142.428
2015—2035	2456.901	8593.691	-11066.008	-81.729	83.430	-0.810

2015—2035 年,建设用地的增加主要来源于草地和耕地的转入,草地转建设用地主要分布在松潘县和汶川县,耕地转建设用地主要分布在松潘和理县。耕地的增加主要来源于草地和水域的转入,大致沿着岷江上游河谷低地分布,主要分布在黑水、茂县、松潘县以及理县和汶川县东部。林地增加,从转移来看得益于草地和水域的转入,主要分布在松潘县境内。水域主要转入林地、耕地和建设用地。

总体来说,无论是 2000—2015 年还是预测的 2035 年,建设用地和耕地的持续增加与林地、草地、水域的转出关系最为密切,呈现出正相关。岷江上游地形复杂,低地和人口多集中在河谷地区,这些区域成为了耕地、建设用地主要的侵占地,也说明随着岷江上游经济的发展,城镇化和工业化的快速推进,人类活动占用生态空间,导致植被破坏,生态退化。因此,随着人口的增加,协调人类需求与生态保护会变得愈加重要。

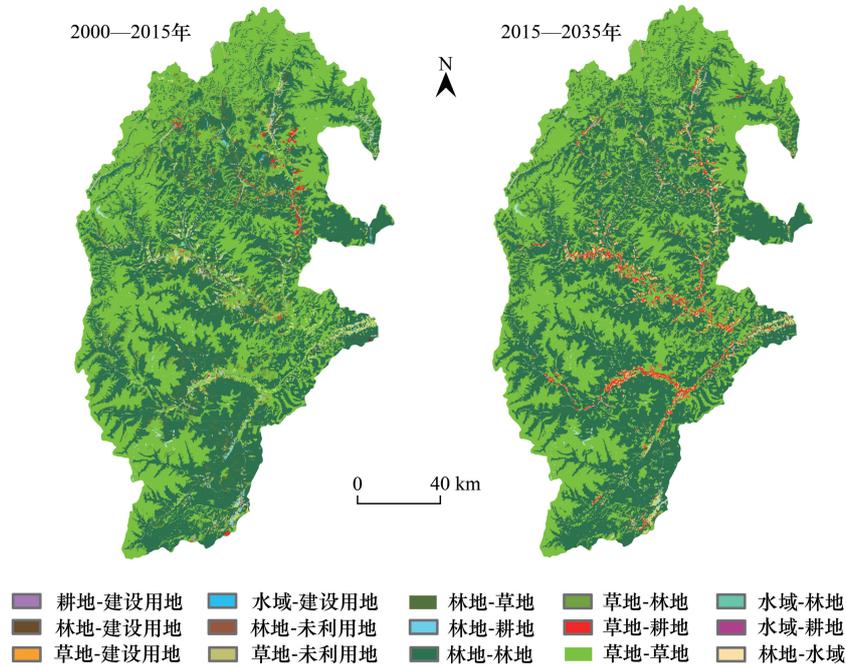


图 4 岷江上游 2000—2035 年土地利用转移

Fig.4 Land use transfer in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

3.2 生态系统服务价值的变化

3.2.1 生态系统服务价值时间变化

由表 3 可知,所有土地利用类型产生的 ESV 中,林地和草地贡献最大,对岷江上游 ESV 有着重要影响。2000—2015 年岷江上游的 ESV 总体增加了 254756.926×10^4 元,一方面虽然这一阶段林地面积减少,但转出主要是向价值较高的生态系统,如草地。另一个方面社会经济调整系数和空间异质系数的变化对其造成影响。2010—2015 年 ESV 下降了 166743.189×10^4 元,这与林地、水域减少,建设用地、耕地增加带来的生态负效应以及单位面积农田食物生产的经济价值差异有关。2015—2035 年,ESV 增加了 56494.557×10^4 元,这与林地面积增加带来的生态正效应密切相关。

由表 4 可知,各单项 ESV 由高到低依次为:维持生物多样性>保持土壤>气体调节>水文调节>气候调节>原材料生产>废物处理>提供美学景观>食物生产。说明岷江上游生态系统在维持生物多样性、保持土壤、气体调节、水文调节和气候调节这五个方面发挥着重要作用,在未来仍然是区域生态系统提供的重要功能以及保护的對象。总体上,2000—2015 年和 2015—2035 年各单项 ESV 都呈现增长的趋势。但是,2015—2035 年各单项 ESV 增长的幅度明显低于 2000—2015 年,说明未来研究区土地生态系统提供各种服务的能力在降低。

表 3 2000—2035 岷江上游各土地利用类型的生态系统服务价值/ 10^4 元

Table 3 Ecosystem service value of various land use types in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land	汇总 Total
2000	8867.101	549914.796	239942.669	8939.736	-113.729	33.557	807584.130
2005	12395.797	762314.119	333749.118	12803.522	-269.866	78.935	1121071.626
2010	13616.947	835437.930	366054.258	14216.865	-376.112	134.357	1229084.246
2015	12064.141	721742.901	316834.023	12000.329	-410.342	110.004	1062341.057
2035	20654.102	828690.597	259681.124	10360.004	-659.719	109.506	1118835.614
2000—2005	3528.697	212399.324	93806.448	3863.785	-156.137	45.379	313487.496
2005—2010	1221.150	73123.811	32305.140	1413.343	-106.246	55.422	108012.620
2010—2015	-1552.806	-113695.029	-49220.235	-2216.536	-34.230	-24.353	-166743.189
2000—2015	3197.041	171828.105	76891.354	3060.592	-296.614	76.448	254756.926
2015—2035	8589.960	106947.696	-57152.899	-1640.325	-249.377	-0.498	56494.557

3.2.2 生态系统服务价值空间变化

由图 5 可知,以村界为基础,根据自然断点法从低到高对研究区 2000—2035 年 ESV 划分了 5 个等级。ESV 较高的地区集中在岷江上游西部,尤其是松潘县的西北部,黑水县、理县和汶川县西部。这些区域海拔高,林地和草地覆盖面积较大,人口及经济活动少。岷江上游的 ESV 低值区主要沿着河谷地带延伸,集中在中东部地区。由于岷江上游地形地质条件复杂,河谷地带地势低平,光热条件较好,人口集中,人为扰动较大,土地利用变更也较西部更快。因此,这些区域 ESV 较低。

由图 6 可知,对 2000—2035 年岷江上游 ESV 变化做冷热点分析。2000—2015 年岷江上游 ESV 增加热点区域主要分布在西部地区,损失冷点区域集中分布在中东部河谷地带。热点地区主要分布在人类活动较少的山区,冷点地区主要分布在人类活动较为频繁的河谷地带,说明人类活动对 ESV 的变化影响较大。2015—2035 年 ESV 增加热点区域集中在西北部,损失冷点区域仍然分布在东部,相比 2000—2015 年冷点区域向理县东部和汶川东部集中,黑水东部的冷点区域有一定规模的缩小。

综上,2035 年 ESV 的高低值分布大致与 2000—2015 年范围相同,说明 2035 年的预测数据能在一定程度上反映岷江上游 ESV 的情况。并且岷江上游中东部地区和河谷地带是人口集中,人类活动最为频繁的地区,也是低值 ESV 和损失冷点的集中分布区,尤其是黑水、汶川和茂县的东部地区。因此,这些区域的生态修复是岷江上游地区生态建设的重点。

表 4 2000—2035 岷江上游单项生态系统服务价值表/10⁴元
 Table 4 Value list of individual ecosystem services in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

年份 Year	供给服务 Supply service		调节服务 Regulation service				支持服务 Support service			文化服务 Cultural service	汇总 Total
	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	废物处理	保持土壤	维持生物多样性	提供美学景观		
2000	16521.934	66186.422	116233.016	113165.496	115660.886	65224.126	126479.518	128476.639	59636.094	807584.130	
2005	22963.459	91794.411	161287.750	157060.208	160523.428	90657.712	175647.784	178334.542	82802.333	1121071.626	
2010	25183.823	100613.009	176803.478	172181.664	175941.554	99429.519	192617.896	195519.523	90793.780	1229084.246	
2015	21813.153	86951.420	152842.808	148852.613	151881.435	85890.437	166626.827	169022.462	78459.901	1062341.057	
2035	22030.497	96933.454	162691.178	157672.067	159841.001	86840.703	172690.752	178001.868	82134.093	1118835.614	
2000—2005	6441.524	25607.989	45054.734	43894.712	44862.542	25433.586	49168.266	49857.902	23166.240	313487.496	
2005—2010	2220.365	8818.599	15515.727	15121.457	15418.126	8771.807	16970.112	17184.981	7991.447	108012.620	
2010—2015	-3370.670	-13661.589	-23960.670	-23329.052	-24060.119	-13539.082	-25991.068	-26497.061	-12333.879	-166743.189	
2000—2015	5291.218	20764.999	36609.792	35687.117	36220.549	20666.312	40147.310	40545.822	18823.807	254756.926	
2015—2035	217.345	9982.033	9848.370	8819.455	7959.567	950.265	6063.925	8979.406	3674.192	56494.557	

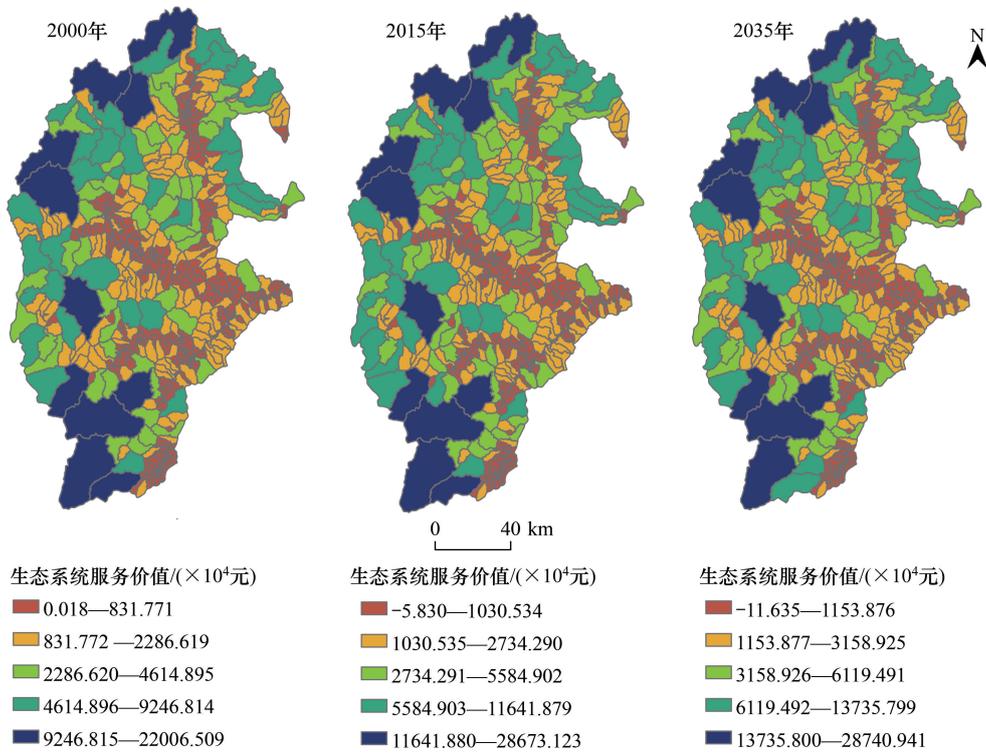


图 5 2000—2035 年岷江上游生态系统服务价值分布

Fig.5 Distribution of the value of ecological services in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

3.3 敏感性分析

本文对各类土地利用类型的生态系统服务价值系数分别上下调整 50%，根据敏感性指数公式，分别求出 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2035 年的敏感性指数。由表 5 可知，其中林地和草地在各时期的敏感性指数均较高，说明两者的变化对 ESV 影响很大。主要原因是林地和草地面积在所有地类中占比最大。不同土地利用类型的敏感性指数，在同一时期具有较明显的差异。但是每一种土地利用类型在不同时期，敏感性指数变化都比较小，且都小于 1，说明价值系数的调整对生态系统服务价值影响不大，估算出的生态系统服务价值结果适用于岷江上游区域。

表 5 2000—2035 年岷江上游敏感性指数

Table 5 Sensitivity Index of in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

土地利用类型 Land use types	2000	2005	2010	2015	2035
耕地 Cultivated land (VC±50%)	0.01098	0.01106	0.01108	0.01136	0.01846
林地 Forest land (VC±50%)	0.68094	0.67999	0.67972	0.67939	0.74067
草地 Grassland (VC±50%)	0.29711	0.29771	0.29783	0.29824	0.23210
水域 Water (VC±50%)	0.01107	0.01142	0.01157	0.01130	0.00926
建设用地 Construction land (VC±50%)	0.00014	0.00024	0.00031	0.00039	0.00059
未利用地 Unutilized land (VC±50%)	0.00004	0.00007	0.00011	0.00010	0.00010

4 结论与讨论

4.1 讨论

岷江上游作为高原和盆地的过渡地带，地质结构复杂，自然资源丰富，生态环境脆弱，其地理环境在川西

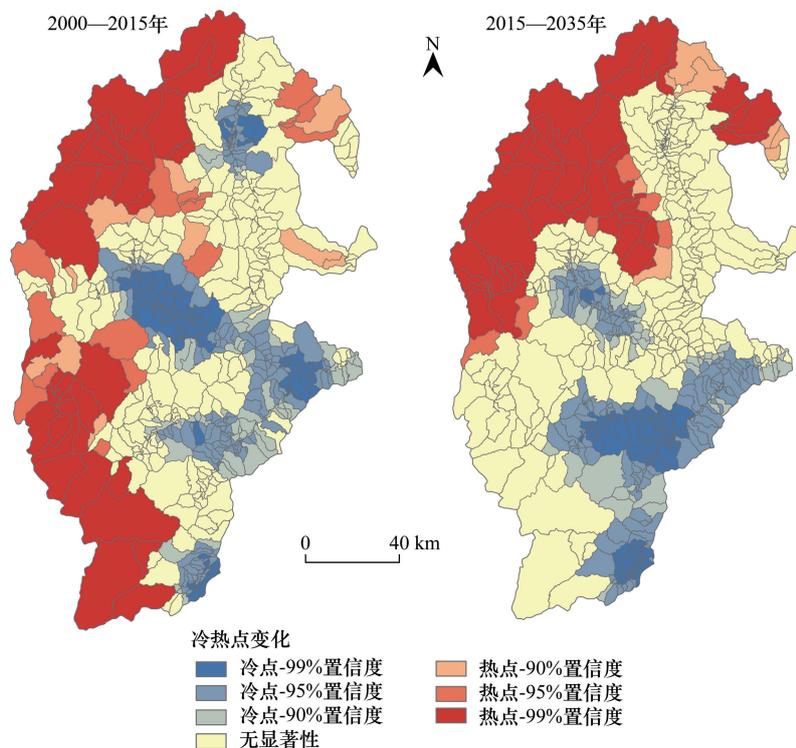


图 6 2000—2035 年岷江上游 ESV 变化冷热点空间分布

Fig.6 Spatial distribution of cold spots and hot spots of ESV changes in the upper reaches of the Minjiang River from 2000 to 2035

高原极具代表性。在气候变化和人类活动的双重作用下,山地水土要素趋向失调、失衡,对区域生态服务产生影响^[39]。因此,加强过渡带研究不仅具有科学内涵^[40],对于长江上游生态屏障建设具有重要战略意义。目前,国内少数研究者对岷江上游的 ESV 进行了研究^[41-45]且与本文部分结果呈现出一致性。比如林地和草地对 ESV 的贡献率最大,林地 ESV 变化最大,ESV 的空间分布呈现西高东低的趋势等。本文在当量因子法的基础上进行了系数修正并且从时空尺度对土地利用格局和 ESV 动态趋势进行研究,发现土地利用的变化会导致 ESV 的协同变化,但修正系数的差异也会对 ESV 产生影响。比如,2000—2005 年和 2000—2015 年林地面积减少幅度较大,但 ESV 增加幅度也较大,造成这种现象的主要原因是修正系数的变化。因此,合理确定 ESV 的修正系数,对真实反应研究区 ESV 的变化具有重要的作用^[46]。

林地、草地是岷江上游高 ESV 的代表^[41-43],且单项功能价值的变化与草地、林地面积变化的相关性大,为了确保岷江上游生态系统发挥生态平衡的作用,建议对这两种地类进行保护或修复,引导形成合理且利于提高 ESV 的土地利用格局。以耕作和城市化等人类活动为主导的土地利用方式往往导致区域 ESV 呈现下降或者减少趋势^[47]。岷江上游河谷低地是耕地和建设用地增加的主要区域也是 ESV 低值分布的主要区域。因此,建议通过制定合理的国土空间规划^[46],加强生态保护红线的管控,开展生态系统修复工作,对 ESV 损失较为严重区域的生态系统进行修复并加以保护,从而提高整个区域生态系统提供服务的能力。

就研究方法而言,本文在使用当量法的过程中,为了减少当量表与研究区现状的脱节,结合区域实际情况进行了系数修正。虽然综合考虑了影响 ESV 的自然和社会经济因素,但岷江上游是青藏高原东缘高山峡谷区,自然地理环境复杂,影响其 ESV 的因素有很多,如,地貌、自然灾害、政策因素等^[48]。因此,还需要进一步的探索,以便构建更为精准的 ESV 估算模型。基于预测的土地利用数据模拟 ESV 变化的过程中,2035 年的修正系数沿用了 2015 年。虽然修正系数会对 ESV 产生影响,比如 2000—2015 年 ESV 的变化。但由于经过敏感性分析,生态系统服务价值对系数缺乏弹性。因此,其影响在可接受的范围内,仍然能对 2035 年 ESV 的变

化做一定程度的反映。

4.2 结论

本文利用自然和社会经济修正因子,构建了符合岷江上游实际情况的 ESV 估算模型。并且利用 CA-Markov 模型,模拟了 2035 年岷江上游土地利用空间格局。从时空尺度分析了西南生态脆弱山区—岷江上游土地利用及 ESV 的动态变化。具体结论如下:

(1) 2000—2035 年,岷江上游土地利用类型以林地和草地为主。建设用地和耕地面积的持续增加与林地、草地和水域的转出呈现正相关,草地、水域和未利用地面积呈现波动变化。从空间上看,未来,岷江上游人类活动的主要区域仍然在河谷地区。

(2) 岷江上游生态系统服务中,林地和草地产生的 ESV 最高。2000—2015 年岷江上游的 ESV 增加了 254756.926×10^4 元,2015—2035 年 ESV 增加了 56494.557×10^4 元,其变化与地类的变化密切相关,尤其是林地、草地和耕地的变化。各单项生态系统服务中,维持生物多样性、保持土壤、气体调节、水文调节和气候调节这五项服务在岷江上游生态系统中起主要的作用,是岷江上游生态系统保护应该关注的服务类型。

(3) 从空间上看,2000—2035 年 ESV 较高区域和变化热点区域集中在岷江上游西部,岷江上游的 ESV 低值区和变化冷点区域主要沿着河谷地带延伸,集中在东部地区。未来,中东部及河谷地区的生态保护应该加以重视。

(4) 通过敏感性分析,各土地利用类型的敏感性指数均小于 1,且每一类土地利用类型的敏感性指数变幅较小,说明生态系统服务价值对价值系数不敏感、缺乏弹性,研究结果可信,并且林地和草地是生态系统服务价值变化的敏感因子。

参考文献 (References):

- [1] Zhao B, Kreuter U, Li B, Ma Z J, Chen J K, Nakagoshi N. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China. *Land Use Policy*, 2004, 21(2): 139-148.
- [2] 兰紫橙, 贾岚, 程煜. 闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系. *生态学报*, 2020, 40(12): 3909-3920.
- [3] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. *生态学报*, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [4] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 冯少茹. 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. *地理学报*, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [5] Liu Y S, Wang D W, Gao J, Deng W. Land use/cover changes, the environment and water resources in Northeast China. *Environmental Management*, 2005, 36(5): 691-701.
- [6] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 陈佑启, Verburg P H. 土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 模型研究进展. *地理学报*, 2009, 64(4): 456-468.
- [7] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [8] 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.
- [9] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 高晴, 姚顺波, 龚直文, 鲁亚楠, 贾磊, 李园园. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响. *生态学报*, 2020, 40(18): 6597-6612.
- [10] 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.
- [11] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [12] 潘洪义, 张琴, 李加安, 徐婕, 黄佩. 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. *生态学报*, 2020, 40(22): 8218-8229.
- [13] 姜栋栋, 马伟波, 邹凤丽, 李海东, 张龙江, 刘桂建. 乡镇尺度大娄山区生态系统服务价值时空变化研究. *环境科学研究*, 2020, 33(12): 2713-2723.
- [14] 王永琪, 马姜明. 基于县域尺度珠江-西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究. *生态学报*, 2020, 40(21): 7826-7839.
- [15] 刘倩, 李葛, 张超, 赵丽, 朱永明. 基于系数修正的青龙县生态系统服务价值动态变化研究. *中国生态农业学报*, 2019, 27(6): 971-980.
- [16] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2019, 39

- (9): 3089-3099.
- [17] 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.
- [18] 郭朝琼, 徐昔保, 舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2086-2096.
- [19] 刘颖, 邓伟, 宋雪茜, 周俊. 基于地形起伏度的山区人口密度修正——以岷江上游为例. 地理科学, 2015, 35(4): 464-470.
- [20] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 罗瑶, 董永波, 王梅芳. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力. 生态学报, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [21] 吴宁, 晏兆丽, 罗鹏, 刘建. 涵化"与岷江上游民族文化多样性. 山地学报, 2003, 21(1): 16-23.
- [22] 潘如玉, 申丽娟, 谢德体, 丁恩俊. 重庆旧城改造区土地覆被与景观格局变化——以北碚区为例. 经济地理, 2015, 35(1): 155-161.
- [23] 李双成, 郑度, 张德铨. 环境与生态系统资本价值评估的区域范式. 地理科学, 2002, 22(3): 270-275.
- [24] Su K, Wei D Z, Lin W X. Evaluation of ecosystem services value and its implications for policy making in China - A case study of Fujian province. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105752.
- [25] Tan Z, Guan Q Y, Lin J K, Yang L Q, Luo H P, Ma Y R, Tian J, Wang Q Z, Wang N. The response and simulation of ecosystem services value to land use/land cover in an oasis, Northwest China. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106711.
- [26] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [27] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 赵景峰, 罗怀良. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1011-1020.
- [28] 刘勇, 李晋昌, 杨永刚. 基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估. 生态学报, 2012, 32(9): 2699-2706.
- [29] 罗永忠, 成自勇, 郭小芹. 近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(1): 221-229.
- [30] 欧名豪, 宗臻铃, 董元华, 杨林章. 区域生态重建的经济补偿办法探讨——以长江上游地区为例. 南京农业大学学报, 2000, 23(4): 109-112.
- [31] 张皓玮, 方斌, 魏巧巧, 瞿颖, 王庆日. 区域耕地生态价值补偿量化模型构建——以江苏省为例. 中国土地科学, 2015, 29(1): 63-70.
- [32] 欧朝蓉, 朱清科, 孙永玉. 干热河谷区土地利用与生态系统服务价值——以云南省元谋县为例. 农业现代化研究, 2018, 39(3): 494-502.
- [33] 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. 资源科学, 2013, 35(1): 30-41.
- [34] 付永虎, 宗婷, 刘俊青, 魏范青. 基于土地利用变化的连云港海岸带生态系统服务价值评估. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 264-273.
- [35] Sang L L, Zhang C, Yang J Y, Zhu D H, Yun W J. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA - Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 54(3/4): 938-943.
- [36] Zheng F Y, Hu Y C. Assessing temporal-spatial land use simulation effects with CLUE-S and Markov-CA models in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(32): 32231-32245.
- [37] Keshtkar H, Voigt W. A spatiotemporal analysis of landscape change using an integrated Markov chain and cellular automata models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2016, 2(1): 10.
- [38] Chen L P, Sun Y J, Saeed S. Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques—A case study of a hilly area, Jiangle, China. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0200493.
- [39] 周鹏, 邓伟, 彭立, 张少尧. 典型山地水土要素时空耦合特征及其成因. 地理学报, 2019, 74(11): 2273-2287.
- [40] 邓伟, 张少尧, 张昊, 彭立, 刘颖. 人文自然耦合视角下过渡性地理空间概念、内涵与属性和研究框架. 地理研究, 2020, 39(4): 761-771.
- [41] 樊敏. 岷江上游山地生态系统服务地域分异过程与补偿阈值. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10): 1289-1298.
- [42] 朱昌丽, 张继飞, 赵宇鸾, 刘春艳. 岷江上游土地利用变化下的生态系统敏感性研究. 人民长江, 2018, 49(11): 35-42.
- [43] 张文广, 胡远满, 刘森, 杨兆平, 常禹, 李秀珍, 杨孟, 问青春. 基于土地利用变化的生态服务价值损益估算——以岷江上游地区为例. 长江流域资源与环境, 2007, 16(6): 821-825.
- [44] 张继飞, 邓伟, 朱昌丽, 赵宇鸾. 岷江上游生态系统服务与居民福祉的空间关联及其动态特征. 山地学报, 2017, 35(3): 388-398.
- [45] 樊敏, 李富程, 郭亚琳, 王青. 退耕还林对岷江上游高山聚落区生态服务价值变化的影响. 山地学报, 2016, 34(3): 356-365.
- [46] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [47] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 798-808.
- [48] 匡奕教, 彭羽, 桑卫国. 湘西生态系统服务时空变化分析. 生态环境学报, 2020, 29(1): 105-113.