

DOI: 10.5846/stxb201911192500

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.

Pan H Y, Zhang Q, Li J A, Xu J, Huang P. Spatial and temporal evolution of ecosystem service value based on dynamic equivalent in Yi-Han severely impoverished areas. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8218-8229.

# 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

潘洪义<sup>1,2,\*</sup>, 张 琴<sup>1,2</sup>, 李加安<sup>1,2</sup>, 徐 婕<sup>1,2</sup>, 黄 佩<sup>1,2</sup>

1 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 610066

2 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610066

**摘要:** 生态系统服务价值是生态保护、主体功能区划定、三生空间确定和生态补偿标准制定的重要依据和基础。以彝汉交错深度贫困区的峨边彝族自治县、马边彝族自治县和金口河区为研究区域, 基于 2000—2015 年土地利用数据, 运用生态服务价值动态当量法, 揭示不同地区的生态系统服务价值的时空演变特征。结果表明: (1) 2000—2015 年研究区内土地利用变化较为强烈, 汉居区、彝汉混居区、彝居区的土地利用强度均呈现增强的趋势, 但变化幅度较小; (2) 研究区生态系统服务价值整体呈现出下降的趋势, 仅在 2010 年略有回升, 且不同生态系统和生态服务功能的价值存在差异; (3) 从空间分布上来看, 生态服务价值总量呈现出中部和西部高、东部低的特征, 且各区域变化方向存在差异, 上升区域主要集中在东部的彝汉混居区和汉居区, 下降区域主要集中在中西部的彝居区和彝汉混居区。基于动态当量进行生态服务系统价值时空演变研究, 立足于变化过程, 着眼于现状, 可为区域的生态补偿机制的建立与生态保护规划提供科学辅助决策。

**关键词:** 动态当量; 生态系统服务价值; 彝汉交错深度贫困区; 时空演变

## Spatial and temporal evolution of ecosystem service value based on dynamic equivalent in Yi-Han severely impoverished areas

PAN Hongyi<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Qin<sup>1,2</sup>, LI Jiaan<sup>1,2</sup>, XU Jie<sup>1,2</sup>, HUANG Pei<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China

2 Geography and Resources Science College, Chengdu 610066, China

**Abstract:** Ecosystem service value (ESV) refers to life support products and services obtained directly or indirectly through the structure, process and function of ecosystem. It is an important basis for ecological protection, delimitation of main functional areas, and determination of production-living-ecological space as well as formulation of ecological compensation standards. The ecosystem has the characteristics of dynamic and complexity, which affects the change of ecosystem service value. Using the method for evaluating the dynamic value equivalent factor in unit area studied the ecosystem service value. And the method considered the characteristics of ecosystems, could evaluate comprehensively ecosystem service value and improve the accuracy of the evaluation results. This method was mainly affected by spatio-temporal regulation factors, thus affecting ecosystem service value. The spatio-temporal regulation factors included net primary productivity, precipitation and soil conservation. The study area included the Mabian Yi Autonomous County, the Ebian Yi Autonomous County and the Jinkouhe Qu. The Mabian Yi Autonomous County was a state-level poverty-stricken county. The Ebian Yi Autonomous County and the Jinkouhe Qu were deep and poverty-stricken counties in the province, which belonged to the two

**基金项目:** 国家自然科学基金(41371125); 教育部规划基金项目(18XJA630005); 四川省教育厅项目(16ZB0061)

**收稿日期:** 2019-11-19; **网络出版日期:** 2020-09-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panhongyi80@163.com

concentrated overlapping areas of the Xiaoliang Mountain and the Wumeng Mountain. They were the most important and the most difficult in poverty alleviation. This paper took Ebian Yi Autonomous County, Mabian Yi Autonomous County and Jinkouhe Qu as the research area in the Yi-Han severely impoverished areas. Based on the data of land use in 2000—2015, this paper revealed the temporal and spatial variation characteristics of ecosystem services in different regions with the dynamic equivalent method of ecological service value, which was of great significance for establishing a fully balanced ecological stability and poverty alleviation mechanism. The results showed that: (1) the change of land use in the study area was relatively strong from 2000 to 2015, and the land use intensity in Han living, Yi-Han mixed living and Yi living showed an increasing trend, but the change range was relatively small. (2) The ecosystem service value of the study area showed a downward trend as a whole, and only rebound slightly in 2010. The values of different ecosystem and ecological service functions were different. (3) From the perspective of spatial distribution, the total value of ecological services was characterized by high in the central and west and low in the east. There are differences in the direction of change among regions. The rising areas were mainly concentrated in Han living and Yi-Han mixed living of the eastern, while the declining areas were mainly concentrated in Yi-Han mixed living and Yi living of the central and western. The method basing on dynamic equivalence studied the spatial and temporal evolution of ecosystem service system value, which focused on the process of change and current situation. It could provide scientific decision-making for the establishment of regional ecological compensation mechanism and ecological protection planning.

**Key Words:** dynamic equivalent; ecosystem service value; Yi-Han severely impoverished areas; spatio-temporal evolution

生态系统服务价值(ESV)是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务<sup>[1]</sup>,对生态系统服务和自然资本用经济法则做出评估<sup>[2]</sup>,是制定生态环境建设补偿政策的必要前提<sup>[3]</sup>。近年来,国内外学者在不同尺度、不同类型生态系统服务价值及其评价技术框架等方面进行了研究<sup>[4]</sup>。1997年 Costanza<sup>[1]</sup>等计算了全球生态系统的服务价值,使生态系统服务价值估算原理及方法在科学意义上得以明确<sup>[5]</sup>,此后生态系统服务价值评估成为生态学的研究热点之一。国外学者主要围绕生态系统服务价值的理论分析框架<sup>[6-7]</sup>、稳定性情况<sup>[8]</sup>、对地表动力学的响应<sup>[9]</sup>等多方面深入探讨,且其演变多与土地利用变化相结合分析<sup>[10-11]</sup>。国内方面,谢高地等在 Costanza 的估算原理方法基础上,结合中国的实际情况,构建了一种基于专家知识的生态系统服务价值化方法,对生态系统服务价值当量因子表进行修订和补充<sup>[5,12-14]</sup>,推动了我国生态系统服务价值评估研究的迅速发展。随后国内学者管青青<sup>[15]</sup>、吴娇<sup>[16]</sup>、汤峰<sup>[17]</sup>等分别引入生态干扰度、人为干扰度、敏感性指数等指标进行分析;商慧敏<sup>[18]</sup>、赵鸿雁<sup>[19]</sup>、肖骁<sup>[20]</sup>等评估了不同土地利用类型的生态系统服务价值;王显金<sup>[21]</sup>、张丽琴<sup>[22]</sup>等基于不同方法和视角对生态系统服务价值进行研究;王云<sup>[23]</sup>和邹月<sup>[24]</sup>等从生态安全格局和景观格局演变等角度分析对生态服务价值的影响;研究尺度也从省域<sup>[4]</sup>、市域<sup>[25]</sup>、县域<sup>[26]</sup>扩展到保护区<sup>[27]</sup>、旅游区<sup>[28]</sup>等敏感区;且多数学者主要研究土地利用变化与生态系统服务价值的相互关系<sup>[29-31]</sup>。综合来看,以往研究多基于单位面积价值当量因子的方法来估算生态系统服务价值,这种静态的评估方法缺点在于未考虑生态系统的动态性和复杂性,无法全面的评估生态系统服务价值,而仅有少数研究基于单位面积价值动态当量法来研究年内动态生态系统服务价值<sup>[14]</sup>,基于年际动态当量视角的生态系统服务价值方面的研究较为鲜见,且未考虑不同民族人群对作为社会存在根基的生态环境发挥的作用。

马边彝族自治县是国家级贫困县,峨边彝族自治县和金口河区是四川省省定深度贫困县,其生态资源环境宏观条件相似,但内部自然环境分异、社会经济和民族构成比例差异明显,在彝汉交错贫困区具有较好的代表性。三县均属于小凉山彝区和乌蒙山区两大集中连片特困重叠区域,是生态脆弱区与贫困区的重叠区域,也是少数民族与汉族交错的主要分布区域,更是脱贫攻坚的重中之重,难中之难,研究该区域的生态系统服务价值对保护贫困区生态环境和建立充分均衡的生态稳定脱贫机制有重要意义。本文以上述三县(区)为研究对象,基于 2000—2015 年土地利用矢量数据,采用土地利用强度指数测算方法,分析其土地利用覆被变化情

况,并在此基础上运用生态服务价值动态当量法,计算出各期动态生态系统服务价值,从不同角度揭示研究区生态系统服务价值的时空演变规律,以期为今后区域生态补偿机制的建立和生态脱贫评估提供参考。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省乐山市西南部,包括峨边彝族自治县、马边彝族自治县和金口河区,介于  $28^{\circ}25'—29^{\circ}25'N$  与  $102^{\circ}54'—103^{\circ}49'E$  之间,地处西南小凉山区,并居横断山脉的东侧,是四川盆地和云贵高原的过渡地带,属于高山地低洼河谷类型,区内地势起伏显著(图1)。气候属于中亚热带湿润季风气候,由于地形的特点,研究区的地貌、气候、植被、土壤及农业利用方式都呈明显的垂直分布规律,因此,生态环境优美,自然资源丰富。截止2015年底,三县幅员面积共  $5207.05\text{ km}^2$ ,总人口42.4万人,其中彝族16.4万人。

### 1.2 数据来源及处理

本文所采用的2000年、2005年、2010年和2015年4期土地利用矢量数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),地类分为6个一级地类和8个二级地类,以土地利用数据为基础,测算其土地利用强度指数;DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud>),用以提取研究区的高程和地形坡度;用于修正当量因子的 Net Primary Productivity (NPP) 数据来源于美国国家航空航天局(<https://www.nasa.gov/>),土壤侵蚀模数和降水数据来源于国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn/>);稻谷、小麦和玉米播种面积以及单位面积平均净利润数据来自《全国农产品成本收益资料汇编》,CPI指数来自于《乐山统计年鉴》,用于1个标准当量因子的生态系统服务价值核算与修正;最后用各地区面积、修正后的当量因子及其标准当量因子的生态系统服务价值计算出4期不同生态系统类型及其各类生态服务功能的生态系统服务价值总量,分析生态系统服务价值的时空变化。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用程度指数

土地利用强度是反映人类干扰的重要指示因子<sup>[32]</sup>,人类通过改变土地利用方式和结构,并增强利用力度来满足自身对土地供给能力的需求,从而影响生态系统结构和功能<sup>[33]</sup>。本文参考庄大方<sup>[34]</sup>和刘红玉<sup>[35-36]</sup>等土地利用程度指数,结合研究区实际情况进行微调(表1),公式如下:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i P_i / A_T \quad (1)$$

式中, $L$ 为土地利用程度综合指数, $A_i$ 和 $A_T$ 分别为第 $i$ 类土地利用类型的面积和研究区总面积, $P_i$ 为不同类型的土地利用程度参数。

表1 不同地类的土地利用程度参数设置( $P_i$ )

Table 1 Determination of land use degree for different land use classes

| 建设用地<br>Built land | 农田<br>Farmland | 森林<br>Forest | 水域<br>Watershed | 裸地<br>Bare land | 湿地<br>Wetland | 草地<br>Grassland |
|--------------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 0.936              | 0.545          | 0.114        | 0.120           | 0.063           | 0.140         | 0.215           |

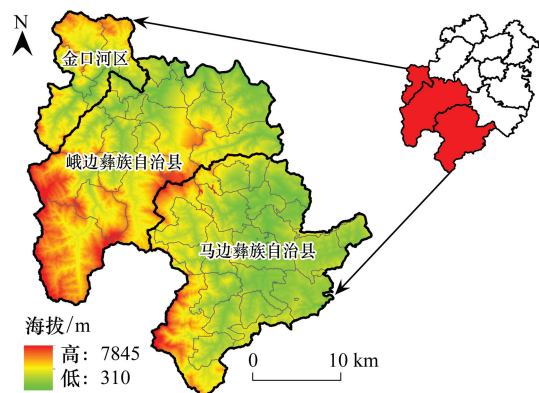


图1 研究区位置及高程示意图

Fig.1 Research area location and elevation diagram

## 2.2 生态系统服务价值当量因子修正与确定

1 个标准单位生态系统生态服务价值当量因子(以下简称标准当量)是指 1 hm<sup>2</sup> 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值<sup>[12]</sup>。本研究参考谢高地等<sup>[5]</sup>的处理方法,将单位面积农田生态系统粮食生产的净利润作为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量<sup>[13]</sup>。由于研究区不同年份的物价水平存在差异,故以 2015 年的物价水平为基准,运用 CPI 指数对不同年份的标准当量因子的生态系统服务价值进行修正,其计算公式如下:

$$D_i = S_{ri} \times F_{ri} + S_{wi} \times F_{wi} + S_{ci} \times F_{ci} \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i \times \alpha_i) \quad (3)$$

式中,  $D_i$  为第  $i$  年的 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(元/hm<sup>2</sup>),  $S_{ri}$ 、 $S_{wi}$  和  $S_{ci}$  为第  $i$  年的稻谷、小麦和玉米的播种面积占 3 种作物播种总面积百分比(%),  $F_{ri}$ 、 $F_{wi}$  和  $F_{ci}$  为第  $i$  年的全国稻谷、小麦和玉米的单位面积平均净利润(元/hm<sup>2</sup>);  $D$  为多年的 1 个标准当量因子的生态系统服务平均价值量(元/hm<sup>2</sup>),  $\alpha_i$  为第  $i$  年相较于基年的 CPI 修正系数。为了增强各年份之间生态系统服务价值的可比性,故四期标准当量采用研究期内的平均值计算<sup>[31]</sup>,研究区 2000—2015 年平均标准当量经修正后的  $D$  值为 2392 元/hm<sup>2</sup>。

## 2.3 生态服务价值动态当量表的构建

单位面积生态系统服务价值动态当量表构建的目的是能够体现生态系统服务价值在空间和时间维度上的差异<sup>[14]</sup>。本研究将生态系统服务分为 4 个一级类型和 11 种二级类型,分别是:①供给服务:食物生产、原材料生产、水资源供给功能;②调节服务:气体调节、气候调节、净化环境、水文调节功能;③支持服务:土壤保持、维持养分循环、维持生物多样性功能;④文化服务则主要为提供美学景观服务功能。参考李士美等<sup>[37-38]</sup>的研究,生态系统食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、维持养分循环、生物多样性和美学景观功能与生物量在总体上呈正相关,水资源供给和水文调节功能与降水变化相关,而土壤保持功能与降水、地形坡度、土壤性质和植被盖度密切相关<sup>[13]</sup>。基于此,与生态系统服务价值基础当量表相结合,按照下式构建生态服务时空动态变化价值当量表<sup>[14]</sup>:

$$F_{nij} = \begin{cases} P_{ij} \times F_{n1} & \text{或} \\ R_{ij} \times F_{n2} & \text{或} \\ S_{ij} \times F_{n3} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $F_{nij}$  指某种生态系统在第  $i$  年第  $j$  地区第  $n$  类生态服务功能的单位面积价值当量因子;  $P_{ij}$  指该类生态系统第  $i$  年第  $j$  地区的 NPP 时空调节因子;  $R_{ij}$  指该类生态系统第  $i$  年第  $j$  地区的降水时空调节因子;  $S_{ij}$  指该类生态系统第  $i$  年第  $j$  地区的土壤保持时空调节因子;  $F_n$  指该类生态系统的第  $n$  种生态服务价值当量因子;  $n1$  表示与 NPP 相关的服务功能;  $n2$  表示与降水相关的服务功能;  $n3$  指土壤保持服务功能。

### 2.3.1 NPP 时空调节因子<sup>[14]</sup>( $P_{ij}$ )

NPP 时空调节因子主要是用于修正食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、维持养分循环、维持生物多样性和提供美学景观这 8 类服务功能的生态服务价值当量因子,其计算公式为:

$$P_{ij} = B_{ij} / \bar{B} \quad (5)$$

式中,  $B_{ij}$  指该类生态系统第  $i$  年第  $j$  地区的 NPP(t/hm<sup>2</sup>),  $\bar{B}$  表示研究区范围该类生态系统的平均 NPP(t/hm<sup>2</sup>)。

### 2.3.2 降水时空调节因子( $R_{ij}$ )

降水时空调节因子主要是用于修正水资源供给和水文调节这 2 类服务功能的生态服务价值当量因子,其计算公式为:

$$R_{ij} = W_{ij} / \bar{W} \quad (6)$$

式中,  $W_{ij}$  指该类生态系统第  $i$  年第  $j$  地区的平均单位面积降水量(mm/hm<sup>2</sup>),  $\bar{W}$  表示研究区年均单位面积降水量(mm/hm<sup>2</sup>)。



### 2.3.3 土壤保持时空调节因子 ( $S_{ij}$ )

土壤保持时空调节因子主要是用于修正土壤保持服务功能的生态服务价值当量因子,其计算公式为:

$$S_{ij} = E_{ij} / \bar{E} \quad (7)$$

式中,  $E_{ij}$  指该类生态系统第  $i$  年第  $j$  地区的土壤保持模拟量,  $\bar{E}$  表示研究区单位面积平均土壤保持模拟量。

## 3 结果分析

### 3.1 单位面积动态生态系统服务价值估算

生态系统是一个复杂多变的动态平衡系统,其组成要素之间相互作用,影响着生态系统服务价值的变化。研究区 2000—2015 年平均标准当量为 2392 元/hm<sup>2</sup>,再基于生态服务价值动态当量表<sup>[14]</sup>,以此得到研究区 2000—2015 年单位面积动态生态系统服务价值(表 2)。

由表 2 可知,单位面积生态系统服务价值因年份、土地利用类型及服务功能的不同而差异显著,如农田的食物生产功能从 2000 年的 2197.26 元/hm<sup>2</sup> 上升到 2015 年的 2314.50 元/hm<sup>2</sup>。总体而言,研究期内食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、维持养分循环、维持生物多样性和提供美学景观 8 类服务功能的单位面积生态服务价值均以 2010 年为分界点,即先降低后升高,其中 2000—2005 年下降幅度较大;水资源供给、水文调节和土壤保持 3 类服务功能的单位面积生态服务价值则在 2000—2005 年呈增加趋势,而后降低,但土壤保持服务功能变化幅度相对较小。

由上图可看出, NPP 时空调节因子 2000—2010 年逐渐下降,2010—2015 年上升,呈现 U 型趋势;而降水和土壤保持时空调节因子 2000—2005 年上升,2005—2015 年逐渐下降,其中降水时空调节因子变化幅度较大。时空调节因子变化特征与上述单位面积生态系统服务价值变化特征相一致,这是由于时空调节因子影响生态服务价值动态当量,从而影响单位面积生态系统服务价值(图 2)。

### 3.2 土地利用强度分析

资料收集和实地调查结果显示,研究区为多民族居住区,因以汉族和彝族人口为主,故将研究区分为汉族聚集居住区、彝族聚集居住区和彝汉混合居住区,在此基础上利用研究区 2000—2015 年土地利用矢量数据,对各居住区土地利用强度指数进行计算,得到 2000—2015 年不同类型居住区土地利用强度综合指数(表 3)。

由表 3 可知,2000—2015 年研究区土地利用强度呈现增强趋势,从 20.25 增加到 20.58,整体利用强度不高,且其变化幅度较小。就各居住区而言,2000—2015 年研究区的汉居区、彝居区和彝汉混居区之间的土地利用强度差异较大。汉居区土地利用强度最高,彝汉混居区次之,彝居区最弱,仅 17.7 左右。研究区主要土地利用类型依次是森林、草地和农田,三者所占面积较大,受人为因素影响,面积变化幅度较大,从而增加了土地利用强度;但由于研究区地形、人们知识水平以及生产生活方式等局限,土地利用强度和变化幅度均较小,也导致彝居区、彝汉混居区、汉居区存在差异。

### 3.3 动态生态系统服务价值分析

#### 3.3.1 动态生态系统服务价值时间变化分析

生态系统服务价值总量与各地区面积、修正后的当量因子及其标准当量因子的生态系统服务价值相关,从而得出各类生态系统和不同服务功能的生态系统服务价值量(表 4、图 3)。2000—2015 年研究区的生态系统服务价值量分别是 210.35、202.46、203.18、198.84 亿元,总体呈现下降趋势,仅在 2005—2010 年略有回升。

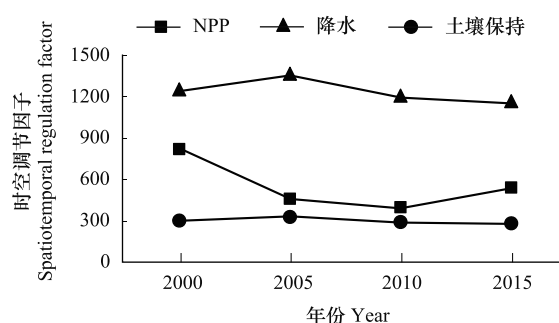


图 2 2000—2015 年研究区时空调节因子变化

Fig.2 Change of temporal-spatial regulating factors in the study area from 2000 to 2015

表 2 2000—2015 年研究区各土地利用类型单位面积动态生态系统服务价值/(元/hm<sup>2</sup>)  
Table 2 Dynamic ecosystem service value per unit area of land use types in the study area from 2000 to 2015

| 土地利用类型<br>Land use types | 年份<br>Year | 供给服务<br>Supply service |              |                |              | 调节服务<br>Regulating service |              |              |              | 支持服务<br>Support service |                |              | 文化服务<br>Cultural service |  |
|--------------------------|------------|------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------|--------------|--------------------------|--|
|                          |            | 食物生产<br>食物生产           | 原料生产<br>原料生产 | 水资源供给<br>水资源供给 | 气体调节<br>气体调节 | 气候调节<br>气候调节               | 净化环境<br>净化环境 | 水文调节<br>水文调节 | 土壤保持<br>土壤保持 | 维持养分循环<br>维持养分循环        | 生物多样性<br>生物多样性 | 美学景观<br>美学景观 |                          |  |
| 农田 Farmland              | 2000       | 2197.26                | 834.69       | -957.06        | 1745.73      | 928.43                     | 262.12       | 1572.57      | 1984.87      | 309.48                  | 336.78         | 152.93       |                          |  |
|                          | 2005       | 2259.27                | 852.52       | -1006.76       | 1795.39      | 954.57                     | 269.63       | 1637.27      | 2036.98      | 318.19                  | 346.30         | 157.18       |                          |  |
|                          | 2010       | 2252.33                | 846.05       | -1022.14       | 1790.14      | 951.59                     | 268.87       | 1651.05      | 2050.38      | 317.20                  | 345.25         | 156.65       |                          |  |
|                          | 2015       | 2314.50                | 869.57       | -1003.51       | 1839.55      | 977.87                     | 276.29       | 1619.36      | 2004.82      | 325.96                  | 354.78         | 160.98       |                          |  |
|                          | 2000       | 675.52                 | 1535.93      | 757.18         | 5047.66      | 15123.66                   | 4505.15      | 10715.08     | 7087.91      | 465.25                  | 5608.39        | 2466.43      |                          |  |
| 森林 Forest                | 2005       | 638.34                 | 1451.41      | 734.99         | 4769.92      | 14291.45                   | 4257.01      | 10403.01     | 6906.29      | 439.65                  | 5299.76        | 2330.71      |                          |  |
|                          | 2010       | 639.27                 | 1453.64      | 742.72         | 4777.46      | 14313.70                   | 4262.43      | 10493.95     | 6959.57      | 440.34                  | 5307.93        | 2334.33      |                          |  |
|                          | 2015       | 618.40                 | 1406.20      | 746.51         | 4621.53      | 13846.52                   | 4123.27      | 10547.20     | 6986.36      | 425.97                  | 5134.68        | 2258.14      |                          |  |
|                          | 2000       | 267.37                 | 374.32       | 191.49         | 1363.61      | 3582.81                    | 1176.45      | 2345.72      | 1606.93      | 133.69                  | 1497.29        | 668.43       |                          |  |
|                          | 2005       | 253.22                 | 354.51       | 194.70         | 1291.42      | 3393.15                    | 1114.17      | 2385.02      | 1643.00      | 126.61                  | 1418.03        | 633.05       |                          |  |
| 草地 Grassland             | 2010       | 256.37                 | 358.92       | 191.93         | 1307.49      | 3435.35                    | 1128.03      | 2351.17      | 1616.68      | 128.18                  | 1435.67        | 640.92       |                          |  |
|                          | 2015       | 251.10                 | 351.54       | 187.34         | 1280.62      | 3364.77                    | 1104.85      | 2294.97      | 1573.39      | 125.55                  | 1406.17        | 627.76       |                          |  |
|                          | 2000       | 1471.48                | 1442.63      | 5625.61        | 5481.98      | 10386.91                   | 10386.91     | 52628.77     | 5152.02      | 519.35                  | 22706.93       | 13647.24     |                          |  |
|                          | 2005       | 1312.94                | 1287.20      | 5612.28        | 4891.35      | 9267.83                    | 9267.83      | 52504.07     | 5168.84      | 463.39                  | 20260.50       | 12176.89     |                          |  |
|                          | 2010       | 1274.51                | 1249.52      | 5756.52        | 4748.17      | 8996.52                    | 8996.52      | 53853.47     | 5268.56      | 449.83                  | 19667.40       | 11820.43     |                          |  |
| 湿地 Wetland               | 2015       | 1338.66                | 1312.41      | 6133.51        | 4987.16      | 9449.36                    | 9449.36      | 57380.28     | 5614.24      | 472.47                  | 20657.36       | 12415.41     |                          |  |
|                          | 2000       | 0.00                   | 0.00         | 0.00           | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 62.84        | 0.00         | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
|                          | 2005       | 0.00                   | 0.00         | 0.00           | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 79.58        | 0.00         | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
|                          | 2010       | 0.00                   | 0.00         | 0.00           | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 80.19        | 0.00         | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
|                          | 2015       | 0.00                   | 0.00         | 0.00           | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 74.17        | 0.00         | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
| 水域 Watershed             | 2000       | 0.00                   | 0.00         | 20318.68       | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 250588.93    | 2010.16      | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
|                          | 2005       | 0.00                   | 0.00         | 24186.06       | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 298285.06    | 2399.62      | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
|                          | 2010       | 0.00                   | 0.00         | 23047.22       | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 284239.72    | 2259.12      | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
|                          | 2015       | 0.00                   | 0.00         | 19487.07       | 0.00         | 0.00                       | 0.00         | 240332.64    | 1887.62      | 0.00                    | 0.00           | 0.00         |                          |  |
|                          | 2000       | 4611.63                | 4187.57      | 25935.90       | 13638.97     | 30021.80                   | 16330.63     | 317913.91    | 17841.90     | 1427.76                 | 30149.39       | 16935.03     |                          |  |
| 总计 Total                 | 2005       | 4463.77                | 3945.64      | 29721.26       | 12748.08     | 27906.99                   | 14908.63     | 365293.99    | 18154.73     | 1347.84                 | 27324.59       | 15297.83     |                          |  |
|                          | 2010       | 4422.47                | 3908.13      | 28716.24       | 12623.25     | 27697.17                   | 14655.85     | 352669.54    | 18154.31     | 1335.55                 | 26756.25       | 14952.34     |                          |  |
|                          | 2015       | 4522.67                | 3939.72      | 25550.92       | 12728.86     | 27638.52                   | 14953.78     | 312248.61    | 18066.43     | 1349.94                 | 27552.99       | 15462.29     |                          |  |

注:2000—2015 年建设用地的各类生态服务功能单位面积动态生态系统服务价值均为 0,因此不在表格中呈现

表 3 2000—2015 年研究区各居住区土地利用强度指数

Table 3 Land use intensity index of residential areas in the study area from 2000 to 2015

| 年份<br>Year | 汉居区<br>Han living | 彝居区<br>Yi living | 彝汉混居<br>Mixed living | 其他<br>Others | 总强度<br>Total intensity of land use |
|------------|-------------------|------------------|----------------------|--------------|------------------------------------|
| 2000       | 25.98             | 17.77            | 22.34                | 12.83        | 20.25                              |
| 2005       | 25.97             | 17.76            | 22.34                | 12.83        | 20.24                              |
| 2010       | 27.02             | 17.93            | 22.64                | 12.83        | 20.56                              |
| 2015       | 27.03             | 17.95            | 22.66                | 12.83        | 20.58                              |

“其他”表示国有林场和自然保护区

表 4 2000—2015 年研究区各类生态系统的生态系统服务价值/万元

Table 4 Ecosystem service value of various ecosystems in the study area from 2000 to 2015

| 生态系统分类<br>Ecosystem classification |                         | 生态系统服务价值<br>Ecosystem service value |            |            |            |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|
| 一级分类<br>First category             | 二级分类<br>Second category | 2000                                | 2005       | 2010       | 2015       |
| 农田 Farmland                        | 旱地                      | 67471.01                            | 68890.12   | 72310.79   | 73102.29   |
|                                    | 水田                      | 11964.89                            | 12635.65   | 13524.36   | 13862.49   |
| 森林 Forest                          | 阔叶                      | 1543034.99                          | 1474985.12 | 1505731.69 | 1476619.15 |
|                                    | 灌木                      | 314023.97                           | 297538.53  | 268813.26  | 262649.65  |
| 草地 Grassland                       | 草地                      | 127482.76                           | 123610.36  | 118874.29  | 116246.07  |
| 湿地 Wetland                         | 湿地                      | 638.65                              | 602.95     | 602.30     | 637.45     |
| 荒漠 Desert                          | 裸地                      | 0.05                                | 0.06       | 0.11       | 0.10       |
| 水域 Watershed                       | 水系                      | 38924.33                            | 46380.78   | 51946.05   | 45264.01   |
| 合计 Total                           |                         | 2103540.66                          | 2024643.57 | 2031802.86 | 1988381.21 |

从各类生态系统的视角分析,研究区 2000—2015 年农田生态系统服务价值持续增加,灌木和草地的价值持续减少,变化幅度较大。2000—2005 年农田、荒漠和水域生态系统服务价值上升,其余地类的价值下降,且下降幅度较大,特别是阔叶林。2005—2010 年灌木林、草地和湿地生态系统服务价值减少,而其他地类的价值大幅度增多,因此 2010 年生态系统服务价值整体有所回升;2010—2015 年仅农田和湿地生态系统服务价值增加,增长幅度较小,其他地类的价值减少,整体生态系统服务价值量下降。

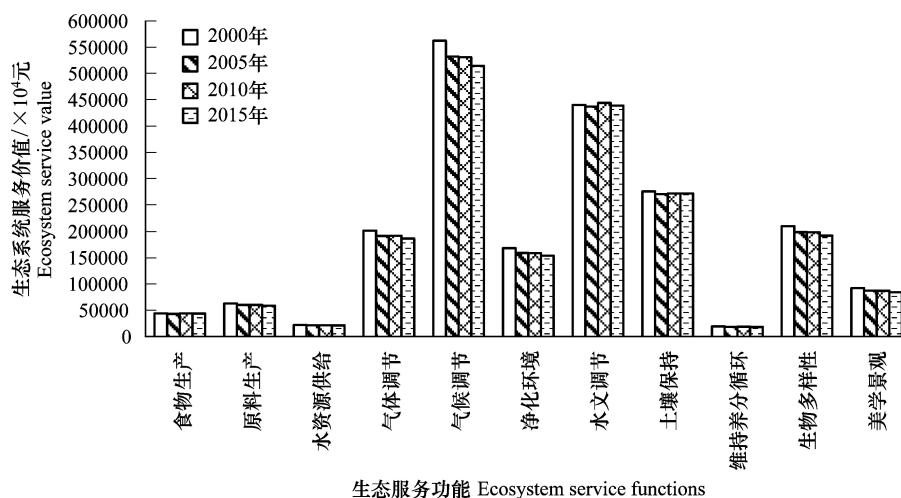


图 3 2000—2015 年研究区不同服务功能的生态系统服务价值

Fig.3 Ecosystem service value of different service functions in the study area from 2000 to 2015

从不同生态服务功能的视角分析,研究区 2000—2015 年不同服务功能的生态系统服务价值存在一定差异,生态系统服务价值量最高的是气候调节,其次是水文调节和土壤保持功能,最低的是水资源供给和维持养分循环功能,且变化幅度较小。2000—2005 年各类服务功能的价值普遍下降,其中气候调节功能价值下降幅度较大;2005—2010 年仅水文调节和土壤保持这两类服务功能价值略有上升,其他服务功能的价值变化幅度不大;2010—2015 年,除食物生产、水资源供给和土壤保持服务功能价值变化极小外,其余服务功能价值均有所下降。

综合上述分析,研究区 2000—2005 年生态系统服务价值量下降幅度较大,主要是因为 NPP 时空调节因子下降了 43.72%,而降水和土壤保持因子虽有所上升,但变化幅度不大,且各生态系统面积变化较小;2005—2010 年生态系统服务价值整体有所回升,主要由于时空调节因子变化幅度较小,森林和草地面积减少,其他地类面积大幅度增加;2010—2015 年生态系统服务价值量整体下降,虽然 NPP 时空调节因子略微上升,但其影响因子呈下降状态,且城镇化进程较快,建设用地占用耕地,同时耕地侵占林地和草地。

### 3.3.2 动态生态系统服务价值空间变化分析

生态系统服务价值总量在时间和空间上都呈现一定的变化特征。在得出 4 个时期不同服务功能的生态系统服务价值基础上,结合研究区 2000—2015 年土地利用矢量数据,利用 ArcGIS 平台呈现生态系统服务价值总量的空间分布及其变化特征(图 4)。

由图 4 可知,研究区 2000—2015 年生态系统服务价值总量的分布存在明显的空间差异,整体呈现出中西部高、东部低的空间分布特征,价值总量高的区域主要集中在中西部的彝居区和彝汉混居区。各居住区面积大小依次是彝汉混居区、彝居区和汉居区,而生态系统服务价值总量最高是彝居区,彝汉混居区次之,汉居区最低。结合研究区高程可知,中西部海拔高,森林覆盖率高,地形起伏大,受人类活动影响相对较小,主要受自然因素影响;东部地形较平坦,人类活动较频繁,城镇发展相对迅速,主要受人文因素影响。加之彝居区、彝汉混居区和汉居区的生产生活方式和知识水平不同,土地利用强度不同,因此生态系统服务价值总量在空间分布上和各居住区分布上均存在差异。

生态系统服务价值总量随时间的变化在空间上变化也较为显著,而生态系统服务价值空间分布未能明确表示其演变规律,因此还需分析生态系统服务价值空间变化特征(图 5)。

研究区 2000—2015 年 4 个时期之间的生态系统服务价值空间变化幅度较大,空间变化最为明显的是彝居区的勒乌乡和彝汉混居区的五渡镇(图 5)。整体而言,2000—2015 年中西部彝居区和彝汉混居区的生态系统服务价值下降,且下降幅度大,东部彝汉混居区和汉居区的生态系统服务价值上升。2000—2005 年研究区东部和北部彝汉混居区和汉居区的生态系统服务价值增加,西部彝居区的价值减少,其中价值增加最多是彝汉混居区的五渡镇,减少最多是彝居区的勒乌乡;该时段对土地利用的强度较小,主要受自然因素影响,西部海拔高,地形起伏大,森林覆盖率高,而东部和北部地形较平坦,农田居多,故 NPP 时空调节因子剧烈下降对其变化影响较深。2005—2010 年研究区生态系统服务价值空间分布变化与上一时段存在较大差异,西部彝居区和彝汉混居区的生态系统服务价值上升,东部汉居区和彝汉混居区的价值下降,上升区域主要集中在彝居区的勒乌乡;主要是因为时空调节因子变化较小,自然因素作用减弱,人类活动影响较大,土地利用强度增加,主要集中在东部,故西部生态系统服务价值相对上升,东部相对减少。对比前两个时段,2010—2015 年研究区生态系统服务价值增长区域在东部且分布较为集中,其他地区生态系统服务价值减少,主要是西部彝居区的勒乌乡;随着社会和经济的发展,该时段人们的生产生活方式以及知识水平提高,机械操作增强,农业活动增多,城镇化进程加快,西部变化较为强烈,东部稳步发展,相比之下,西部生态系统服务价值降低,东部则略微上升。

## 4 结论与讨论

本文选取彝汉交错深度贫困区的峨边彝族自治县、马边彝族自治县和金口河区为研究区域,基于 2000



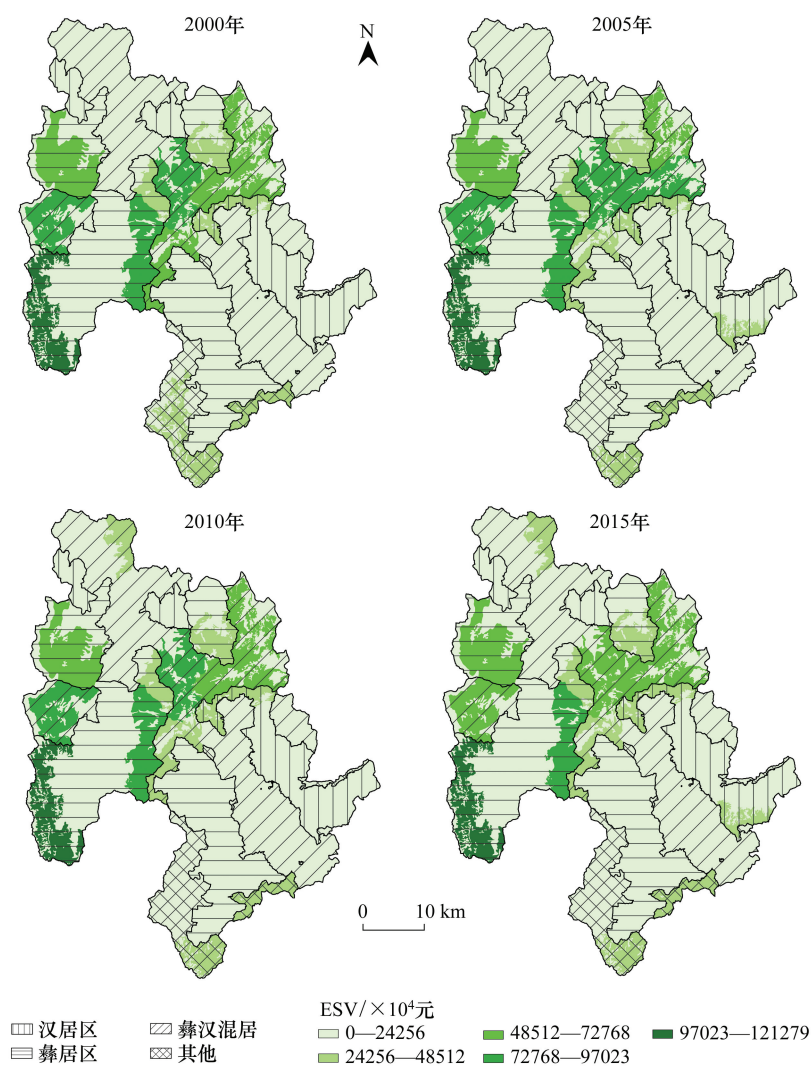


图4 2000—2015年研究区生态系统服务价值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecosystem service value in the study area from 2000 to 2015

年、2005年、2010年和2015年4期土地利用数据,分析各居住区土地利用强度综合指数变化,并运用生态服务价值动态当量法,得出研究区4个时期的生态系统服务价值,结果表明:

(1)2000—2015年研究区各居住区土地利用强度整体呈现增强的趋势,但变化幅度较小。汉居区、彝居区和彝汉混居区之间的土地利用强度差异较为明显,汉居区土地利用强度最高,彝汉混居区次之,彝居区最弱。

(2)2000—2015年研究区生态系统服务价值总体呈现下降趋势,且不同生态系统和生态服务功能存在差异。研究区4个时期的生态系统服务价值量分别是210.35亿元、202.46亿元、203.18亿元、198.84亿元,仅在2010年略有回升。研究区2000—2015年各类生态系统的生态服务价值差距大,森林价值最高,荒漠价值最低,农田价值连续增加,灌木和草地价值连续较少;从不同生态服务功能来看也存在一定差异,最为显著的是气候调节,其次是水文调节和土壤保持,且气候调节功能价值变化幅度较大。

(3)2000—2015年研究区生态系统服务价值总量整体呈现出西部和中部高、东部低的空间分异特征,且各区域变化方向存在差异。生态系统服务价值总量最高的是西部彝居区,中部彝汉混居区次之,东部汉居区最低。研究区2000—2015年生态系统服务价值变化值与生态系统服务价值总量空间分布一致,中西部彝居

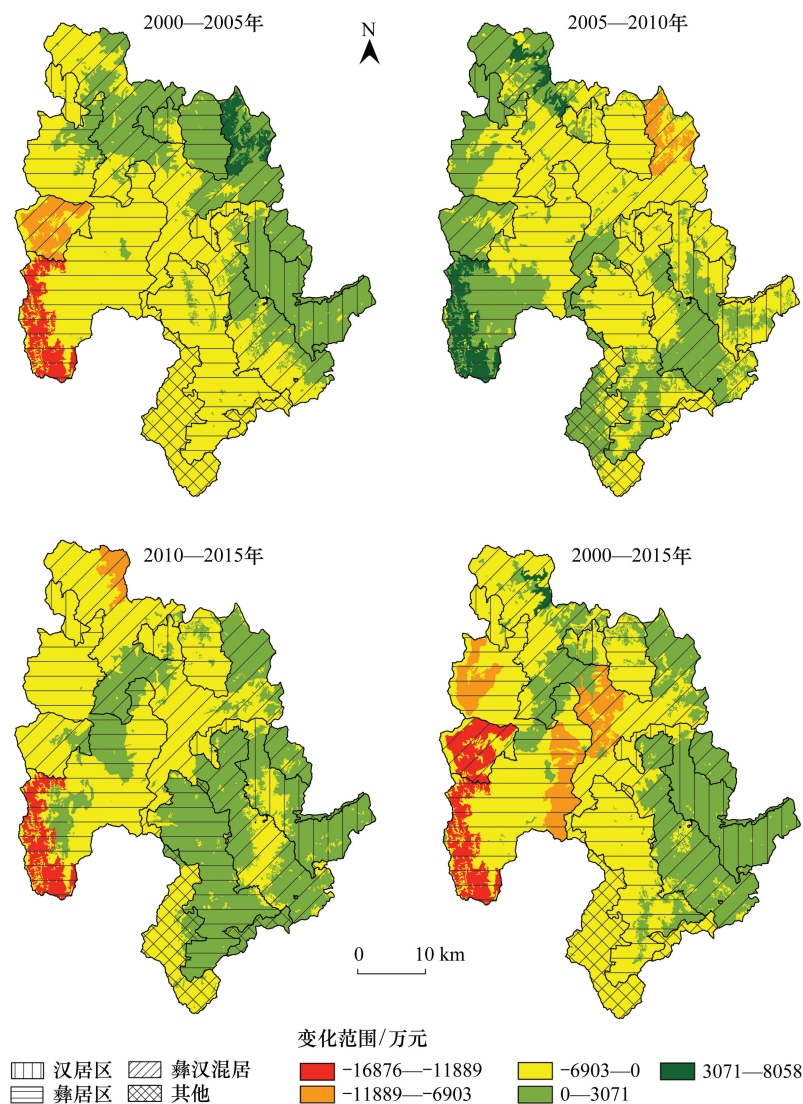


图5 2000—2015年研究区生态系统服务价值空间分布变化

Fig.5 Spatial change of ecosystem service value in the study area from 2000 to 2015

区和彝汉混居区的生态系统服务价值下降,东部彝汉混居区和汉居区的生态系统服务价值上升,但受自然和人为因素影响程度不同,且3个时段生态系统服务价值空间变化不同。

目前生态服务价值核算方法可以分为基于单位服务功能价格的方法(功能价值法)和基于单位面积价值当量因子的方法(当量因子法)两类<sup>[14]</sup>。研究学者们多用当量因子法分析静态生态系统服务价值,而谢高地<sup>[14]</sup>等人改进当量因子法,构建单位面积生态服务价值动态当量表,在此基础上结合研究区实际情况,运用动态当量法分析动态生态系统服务价值,区别于传统的静态生态系统服务价值评估,能更为全面的评估生态系统服务价值,提高评价结果的准确性。该模型中生态系统服务价值量采用的为2000—2015年的平均值,虽然加强了各年份的可比性,但在一定程度上弱化了单个年份的数据特性;同时该模型对社会经济因素考虑较少。本文的分析有利于了解区域生态环境状况,进而开展生态功能保护,利于构建生态资源累积效应模型,为建立生态补偿机制以及今后进一步研究提供参考,进而有利于研究区生态脱贫。需要指出的是,时空调节因子影响动态当量,进而影响单位面积生态系统服务价值,更好展现生态系统的动态性,加之土地利用强度影响不同土地利用类型面积,综合影响生态系统服务价值总量的变化。其次,研究区各居住区的生态系统服务价

值变化与土地利用强度变化呈负相关,即土地利用程度越大,生态系统服务价值越低,这与众多的研究结果<sup>[35]</sup>一致。最后,本文探讨了时空调节因子和土地利用强度等因素对研究区生态系统服务价值空间分布的影响,而生态系统服务价值受诸多因素影响,如县域生态资源本底状况、生活生产方式等自然和人为因素,此类因素如何影响生态系统服务价值的空间分布是今后需要进一步解决的科学问题。

#### 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] 李丽, 王心源, 骆磊, 冀欣阳, 赵燕, 赵颜创, Bachagha N. 生态系统服务价值评估方法综述. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1233-1245.
- [3] 刘军会, 高吉喜. 北方农牧交错带生态系统服务价值测算及变化. *山地学报*, 2008, 26(2): 145-153.
- [4] 熊鹰, 张方明, 龚长安, 罗朋. LUCC 影响下湖南省生态系统服务价值时空演变. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(6): 1397-1408.
- [5] 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.
- [6] Rawlins J M, De Lange W J, Fraser G C G. An ecosystem service value chain analysis framework: a conceptual paper. *Ecological Economics*, 2018, 147: 84-95.
- [7] Quintas-Soriano C, Martín-López B, Santos-Martín F, Loureiro M, Montes C, Benayas J, García-Llorente M. Ecosystem services values in Spain: a meta-analysis. *Environmental Science & Policy*, 2016, 55: 186-195.
- [8] Lloyd-Smith P. A note on the robustness of aggregate ecosystem service values. *Ecological Economics*, 2018, 146: 778-780.
- [9] Sannigrahi S, Bhatt S, Rahmat S, Paul S K, Sen S. Estimating global ecosystem service values and its response to land surface dynamics during 1995-2015. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223: 115-131.
- [10] Milheiras S G, Mace G M. Assessing ecosystem service provision in a tropical region with high forest cover: spatial overlap and the impact of land use change in Amapá, Brazil. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 12-18.
- [11] Asadolahi Z, Salmanmahiny A, Sakieh Y, Mirkarimi S H, Baral H, Azimi M. Dynamic trade-off analysis of multiple ecosystem services under land use change scenarios: towards putting ecosystem services into planning in Iran. *Ecological Complexity*, 2018, 36: 250-260.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 高阳, 王宏亮, 李牧. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 195-207.
- [16] 吴娇, 刘春霞, 李月臣. 三峡库区(重庆段)生态系统服务价值变化及其对人为干扰的响应. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 334-341.
- [17] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 赵丽, 郑宇, 魏明欢, 简卿. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2675-2684.
- [18] 商慧敏, 郗敏, 李悦, 孔范龙, 王森. 胶州湾滨海湿地生态系统服务价值变化. *生态学报*, 2018, 38(2): 421-431.
- [19] 赵鸿雁, 陈英, 杨洁, 裴婷婷. 基于改进当量的甘肃省耕地生态系统服务价值及其与区域经济发展的空间关系研究. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 851-858.
- [20] 肖骁, 穆治霖, 赵雪雁, 李京忠, 薛冰. 基于 RS/GIS 的东北地区森林生态系统服务功能价值评估. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3298-3304.
- [21] 王显金, 钟昌标. 基于 CVM 的海涂湿地生态服务价值的模糊评估模型. *生态学报*, 2018, 38(8): 2974-2983.
- [22] 张丽琴, 渠丽萍, 吕春艳, 李玲. 基于空间格局视角的武汉市土地生态系统服务价值研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9): 1988-1997.
- [23] 王云, 潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. *生态学报*, 2019, 39(10): 3455-3467.
- [24] 邹月, 周忠学. 西安市景观格局演变对生态系统服务价值的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2629-2639.
- [25] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 丁振民, 鲁亚楠, 郑雪, 李雅男. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 539-552.
- [26] 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.
- [27] 李哲, 张飞, Kung H T, 张月, 井云清. 1998—2014 年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值及其时空变异. *生态学报*, 2017, 37(15): 4984-4997.

- [28] 李冬杰, 杨利, 余俞寒, 罗文斌, 王兆峰. 都市生态旅游区土地利用碎片化对生态系统服务价值的影响——以武汉东湖生态旅游区为例. 生态学报, 2019, 39(13): 4782-4792.
- [29] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 唐建军. 近 30 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应. 生态学报, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [30] 盛晓雯, 曹银贵, 周伟, 成陆, 张辉. 京津冀地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 中国农业资源与区划, 2018, 39(6): 79-86.
- [31] 李佳鸣, 冯长春. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究——以内蒙古自治区为例. 生态学报, 2019, 39(13): 4741-4750.
- [32] 蒋斋, 孙小银, 刘飞, 单瑞峰, 樊玉娜, 丛文翠. 1975—2015 年南四湖自然保护区生态系统服务价值时空变化分析. 生态科学, 2019, 38(3): 201-210.
- [33] 柳冬青, 张金茜, 巩杰, 钱彩云. 陇中黄土丘陵区土地利用强度-生态系统服务-人类福祉时空关系研究——以安定区为例. 生态学报, 2019, 39(2): 637-648.
- [34] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.
- [35] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. 生态学报, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [36] 陈浮, 葛小平, 陈刚, 彭补拙. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究. 地理科学, 2001, 21(3): 210-216.
- [37] 李士美. 基于定位观测网络的典型生态系统服务流量过程研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2010.
- [38] 裴厦. 基于野外台站的典型生态系统服务及价值流量过程研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2013.