

基于多源数据的岷江上游生态系统服务价值动态评估

郭兵^{1,2,3,4}, 姜琳¹, 孙彩红¹, 韩芳¹

(1. 山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室, 武汉 430079; 3. 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 武汉 430062; 4. 东华理工大学 江西省数字国土重点实验室, 南昌 330013)

摘要:为深入了解四川省重要生态屏障—岷江上游地区的生态系统服务功能,在RS、GIS技术的支持下,综合运用RUSLE模型、CASA模型以及水源涵养模型结合影子工程法、碳税法、造林成本法、能量替代法等环境经济方法,对岷江上游的生态系统服务价值进行了科学评估,揭示了生态系统服务价值的时空变化格局及其驱动机制。结果表明:(1) 2003—2013年,岷江上游生态服务价值总值呈现先增加(2003—2007年)后减小(2007—2013年)的趋势。(2) 2007年单位面积生态服务价值相对于2003年呈现较大幅度增加,而2013年比2007年的单位面积生态服务价值有所减少。(3) 岷江上游各项生态系统服务价值均在10月份达到最小值,而土壤保育价值和水源涵养价值在8月份达到最大值,基于NPP的固碳释氧、有机质生产和营养物质循环价值则在7月份达到最大值。(4) 2003—2007年,松潘县的生态系统服务价值总值增加幅度最大,2007—2013年,各县的生态系统服务价值总值均表现为一定程度的减小,其中汶川县的减小幅度最大。相关研究成果不仅可以为岷江上游的生态环境保护提供技术支持,还可以为区域经济建设和生态补偿提供决策参考。

关键词:生态系统服务; 岷江上游; 环境经济法; 价值评估; 时空变化

中图分类号:X87

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0131-08

Dynamic Evaluation on Ecosystem Service Value of the Upper Reaches of Minjiang River Based on Multi-Source Data

GUO Bing^{1,2,3,4}, JIANG Lin¹, SUN Caihong¹, HAN Fang¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China; 2. Key Laboratory for National Geographic Census and Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan 430079, China; 3. Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response (Hubei University), Wuhan 430062, China; 4. Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The Upper Reaches of Minjiang River, as a typically fragile eco-system zone, is an important ecological protection region of Yangtze River. Utilizing the geographic information system and remote sensing, we have obtained the evaluations of the soil conservation, carbon sequestration and oxygen release, nutrient cycling, organic production and water conservation in 2003, 2007, and 2013 with the models of regional water balance, RUSLE and CASA based on multi-source data (remote sensing images, meteorological observations, land-use types, and so on). Then the spatial and temporal change patterns of ecosystem service values of the Upper Reaches of Minjiang River were analyzed. The results showed that: (1) during 2003—2013, there were an increasing trend in the gross of ecosystem service value for 2003—2007 and a decreasing trend for 2007—2013, respectively; (2) in 2007, the ecosystem service value of unit area increased compared with that of 2003 while there was a slightly decreasing change during 2007—2013; (3) each part of ecosystem service in the Upper Reaches of the Minjiang River reached the minimum value in October, while the values of water conservation and soil conservation reached the maximum in August; meanwhile, the values of carbon sequestration and oxygen release, the organic production, and nutrient recycling derived from net prima-

收稿日期:2016-12-22

修回日期:2017-01-05

资助项目:地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(2016NGCM02);山东理工大学教学研究与改革项目(116205);国家自然科学基金(41501425);山东省自然科学基金(ZR2014DL001);东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放研究基金(DLLJ201709);区域开发与环境响应湖北省重点实验室开放研究基金(2017(B)003)

第一作者:郭兵(1987—),男,山东淄博人,博士,讲师,研究方向为生态环境遥感。E-mail:guobingjl@163.com

通信作者:姜琳(1987—),女,山东文登人,硕士,研究方向为环境遥感。E-mail:linlin20061998@126.com

ry productivity (NPP) reached the maximum in July; (4) during 2003—2007, the ecosystem service value of Songpan county had the largest increase while that of Heishui County was the smallest; on the contrary, there was a decreasing trend in ecosystem service value for all five counties, among which the Wenchuan County had the largest reduction during 2007—2013; (5) compared with other land use types, the forest had higher capacities of soil conservation, net primary production, and water conservation. Therefore, it was of great importance to improve the condition of forest for raising the ecosystem service value of the Upper Reaches of Minjiang River. The main driving forces of ecosystem service value changes were composed of natural factors (such as earthquake, landslide, debris flow, vegetation, and climate fluctuations) and human disturbances (such as deforestation, land overuse, unreasonable economic structure). The improvement of ecosystem service value can reduce soil erosion and protect the farmland in the Middle and Lower reaches, which is of great significance for the sustainable economic development in the Upper Reaches of the Minjiang River. The results can not only provide the basis for the ecological environment management, but also strengthen the concept of environmental protection.

Keywords: upper reaches of Minjiang River; ecosystem service; environment economy method; value evaluation; spatial and temporal variations

生态系统通过提供不同的生态服务功能实现对人类的服务价值。如何正确划分生态服务功能类型是国内外学者普遍关注的问题^[1-2]。20世纪以来,频繁发生的自然灾害不仅威胁到人类的生命财产安全,同时也对国民经济造成了巨大的损失,这促使各个国家开始逐步关注经济发展与生态环境的关系,以谋求经济、资源与环境三者的协调发展。生态系统服务功能价值的量化,不仅可以为政府部门对生态系统的保护提供经济决策依据,也可以以货币价值的尺度来衡量生态系统服务为人类生存发展所提供的福利,从而减少甚至避免人类由于短期经济行为对生态系统造成破坏。

国内外对生态系统服务价值的研究中,由于生态功能划分的不同,价值算法上又多采用替代法进行计算,不同人采用的参数不一样,导致同一片区域不同估算结果差异很大^[3-5]。如何准确定价生态价值成为未来生态价值研究的热点与难点。目前国内对生态价值的估算方法主要有3种:当量因子表法,直接引用谢高地等^[6]制定的不同土地利用类型下的单位面积生态服务价值当量因子表进行陆地生态系统服务价值研究^[7-13]。条件价值法,即通过现场调查访问当地居民对当地生态保护所愿支付的金钱数额;它可以反映人们的主观意愿,但是由于人类心理因素以及社会习俗和文化背景差异大,调查问卷的设计以及调查对象的确定直接影响结果的准确性。虽然此种方法还存在着一定的缺陷,但是还是得到了普遍的认可和使用^[14-17]。物质质量估算法,根据模型或者相关方法算出生态系统服务功能的物质质量,再依据环境经济方法估算物质质量提供的各项生态服务价值^[18-21]。此种方法在计算物质质量的时候可以结合遥感数据和GIS技术,

不仅实现生态价值的空间和时间尺度上的连续性,而且结合典型样点的实测数据可以进行本地化参数的修改,从而更好的体现生态服务价值的本地化特征。

岷江上游是长江流域重要的生态保障区,但是区域内脆弱的地质条件、复杂的气候因素以及人类长期的过度干扰利用使得该地区滑坡、泥石流等自然灾害频发,生态系统服务功能严重受损。开展岷江上游生态服务价值评估不仅可以为当地的生态环境保护、经济建设、生态补偿提供依据,也可以提高居民的生态服务价值观和强化生态环境保护的观念。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

岷江上游位于四川盆地的西北部(102°59′—104°14′E, 31°26′—33°16′N),流域面积为24 600 km²,与汶川县、理县、茂县、黑水县和松潘县5个县的行政边界基本吻合。岷江上游地处青藏高原高原东缘高山峡谷地带,地势南高北低,平均海拔3 400 m,属于典型的高山峡谷景观^[17]。区内地形复杂,气候差异显著,具有山地立体型气候特征。降水季节分配不均,干湿季分明,主要集中在5—10月,占全年降水量的85%左右,且多大雨、暴雨,降水强度大。流域内的土地覆被类型主要以林地为主,草地次之,耕地分布较少^[17]。地质构造活跃,坡面和谷地侵蚀严重,滑坡、泥石流等地质灾害频发。流域内土壤和气候的垂直地带性决定了该区植被的种类和分布,其植被类型主要有高山草甸、高山灌丛、亚高山针、阔叶林以及干旱河谷地区的耐旱灌丛。

1.2 数据来源

本研究中MODIS13Q1 16 d合成的NDVI产品

主要来源于美国航空航天局(NASA),共69帧影像(2003年、2007年、2013年三期),利用MODIS Projection Tool(MRT)对NDVI产品数据集进行拼接和重投影(阿尔伯斯等积投影),空间分辨率为250 m。气象数据主要来源于中国气象数据共享网,包括岷江上游以及周边45个气象站点1981—2013年33 a的日降雨数据、日均风速、日均气压、日均温度、日均相对湿度、日最低温度、日最高温度及日照时数数据,以及岷江上游以及周边25个站点的太阳辐射数据(来自中国太阳辐射台站基础资料数据集),单位为MJ/m²。2003年、2007年、2013年三期1:10万岷江上游土地利用数据来源于中国科学院成都山地灾害与环境研究所数字山地中心科学数据库。1:100万土壤类型数据由地球系统科学数据共享网下载获取,而土壤属性中的N、P、K、有机质的含量以及黏粒、粉粒和砂粒的含量则来自《四川省土种志》。30 m分辨率DEM数据和社会经济数据则分别来源于国际科学数据服务平台和四川省统计年鉴。本研究基于ENVI 5.2和ArcGIS 10.2对所有数据进行预处理,数据空间分辨率为1 000 m,投影类型Krassovsky-Albers。

2 研究方法

本文选取岷江上游保育土壤、固碳释氧、营养物质循环、有机质生产以及水源涵养5类生态服务功能,利用RUSLE模型、CASA模型以及区域水量平衡法分别获取岷江上游2003年、2007年、2013年5—10月各月的土壤保持量、NPP产量以及水源涵养量,并基于以上3种物质质量,结合环境经济方法反演岷江上游生态服务价值,并从多角度对研究区生态服务价值的时空变化格局进行分析和探讨。

2.1 生态服务功能物质质量的估算

2.1.1 基于RUSLE的土壤保持物质质量估算模型

本研究采用RUSLE模型估算岷江上游土壤潜在侵蚀量与现实侵蚀量,两者之差为岷江上游的土壤保持量,表达式如下:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot (1-C \cdot P) \quad (1)$$

$$R=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\alpha \sum_{j=1}^m P^{\beta} d_{ij} \right)$$

$$\alpha=21.239\beta^{-7.3967}$$

$$\beta=0.6243+\frac{27.346}{P_{d12}}$$

$$\overline{P_{d12}}=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m P_{il}$$

$$i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,m; l=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256S_a\left(1-\frac{S_i}{100}\right)\right]\right\}\left(\frac{S_i}{C_i+S_i}\right)^{0.3} \times$$

$$\left[1-\frac{0.25C_0}{C_0+\exp(3.72-2.95C_0)}\right] \times \left[1-\frac{0.7S_n}{S_n+\exp(-5.51+22.9S_n)}\right] \quad (3)$$

$$L=(\lambda/22.13)^m$$

$$m=\begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (4)$$

$$S=\begin{cases} 10.8\sin\theta+0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta-0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta-0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$f_g=(NDVI-NDVI_0)/(NDVI_g-NDVI_0)$$

$$C=\begin{cases} 1 & f_g=0 \\ 0.6508-0.3436f_g & 0 < f_g \leq 78.3\% \\ 0 & f_g > 78.3\% \end{cases} \quad (6)$$

式中:A为土壤保持量(t/hm²);R为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h)];K为土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)];LS为坡度坡向因子,无量纲;C为植被覆盖因子,无量纲;P为水土保持措施因子,包括工程措施和耕作措施因子,根据岷江上游地区的土地利用数据进行赋值获取,无量纲;S_a为沙粒含量(%);S_i为粉粒(%);C_i为黏粒含量(%);S_n为1-S_a;C₀为有机质含量(%);θ为坡度(°);f_g为植被覆盖度,无量纲。考虑到降水和植被的季节动态性以及两者随季节变化所产生的不同耦合作用,本研究采用了齐述华^[22]修正后的月模式方程:

$$A=\sum_{m=1}^{12} [K \cdot LS \cdot R_m \cdot (1-P \cdot C_m)] \quad (7)$$

式中:m为月份。

2.1.2 基于CASA模型的NPP物质质量的估算方法

本文采用国内外广泛应用的CASA模型估算岷江上游NPP产量^[23-24],表达式如下:

$$NPP(x,t)=APAR(x,t) \times \epsilon(x,t) \quad (8)$$

式中:NPP(x,t)为净初级生产力(gC/m²);APAR(x,t)为像元x在t月吸收的光合有效辐射[gC/(m²·月)];ε(x,t)为像元x在t月的实际光能利用率(gC/MJ)。

APAR(x,t)计算公式为:

$$APAR(x,t)=SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \quad (9)$$

式中:SOL(x,t)表示像元x在t月时接收的太阳总辐射量[gC/(m²·月)];FPAR(x,t)为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例,无量纲;常数0.5表示有一半的太阳入射辐射处于FPAR的光谱范围(0.4~0.7 μm)^[16]。

ε(x,t)的计算公式为:

$$\epsilon(x,t)=T\epsilon_1(x,t) \cdot T\epsilon_2(x,t) \cdot W\epsilon(x,t) \cdot \epsilon_{\max} \quad (10)$$

式中: $T_{\varepsilon_1}(x, t)$ 和 $T_{\varepsilon_2}(x, t)$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用, 无量纲; $W_{\varepsilon}(x, t)$ 为水分胁迫影响系数, 反映水分条件的影响, 无量纲; ε_{\max} 是理想条件下的最大光能利用率 (gC/MJ)。

2.1.3 基于区域水量平衡法的水源涵养量的估算
水源涵养概念较广, 主要表现形式包括生态系统的拦蓄降水、调节径流、影响降雨量、净化水质等。目前水源涵养量的定量评估方法主要有蓄水能力法和区域水量平衡法, 考虑到该区的实际情况和特殊地理位置以及现有资料数据, 本研究采用区域水量平衡法估算岷江上游水源涵养量^[25], 表达式如下:

$$W_{\text{water}} = W_{\text{pre}} - W_{\text{et}} \quad (11)$$

式中: W_{water} 为水源涵养量 (mm); W_{pre} 为降雨量 (mm); W_{et} 为实际蒸散量 (mm)。

2.2 生态服务功能价值的估算

2.2.1 基于土壤保持量的土壤保育功能生态价值估算
土壤保育功能包括保肥和保土两方面, 因此土壤保育功能的生态价值等于保肥价值与保土价值之和。

土壤中含有大量的营养物质, 主要包括 N, P, K, 植被等陆表生态系统可以有效地减少水土流失, 保持土壤中的营养物质。而 N, P, K 的保持量可以折算成化肥的数量, 利用影子价格法^[25] 算出保肥价值, 公式如下:

$$V_1 = \frac{A}{100} \times \left(\frac{C_1}{R_1} \times P_1 + \frac{C_2}{R_2} \times P_1 + \frac{C_3}{R_3} \times P_2 \right) \times 10^6 \quad (12)$$

式中: V_1 为保肥价值 ($\text{元}/\text{m}^2$); A 为土壤保持量 (t/hm^2); C_1, C_2, C_3 为土壤中 N, P, K 的百分含量 (%); R_1, R_2, R_3 分别为 N, P 折算为磷酸二铵的系数、K 折算为氯化钾的系数, 分别为: 14%, 15.01%, 50%; P_1, P_2 为磷酸二铵化肥、氯化钾肥的市场价格, 元/t。其中化肥的市场价格来自于《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008), 见表 1。

水土流失能够造成水库和河道堵塞, 而植被则会较好地保持土壤, 防止水土流失, 从而实现生态系统的保土功能。保土价值的估算利用影子工程法^[26], 即挖取土方的费用来实现, 具体公式如下:

$$V_2 = \frac{A}{100 \times \rho} \times P \times 10^6 \quad (13)$$

式中: V_2 为保土价值 ($\text{元}/\text{m}^2$); A 为土壤的保持量 (t/hm^2); ρ 为土壤容重 (g/cm^3), 取均值为 $0.98 \text{ g}/\text{cm}^3$; P 为挖取单位体积土方的费用 ($\text{元}/\text{m}^3$), 见表 1。

2.2.2 基于 NPP 的生态功能价值估算 (1) 固碳释氧功能的价值估算。生态系统中的绿色植物可通过光合作用吸收 CO_2 , 释放出 O_2 , 从而实现生态系统

的固碳释氧功能。根据光合作用公式可得出, 植被每生成 1 g NPP , 可以固定 $11/3 \text{ g CO}_2$, 同时释放出 $8/3 \text{ g O}_2$, 然后分别根据碳税法^[27], 造林成本法^[28] 算出固碳、释氧的价值, 其公式为:

$$V_3 = M \times \left(\frac{11}{3} \times P_3 + \frac{8}{3} \times P_4 \right) \times 10^6 \quad (14)$$

式中: V_3 为固碳释氧价值 ($\text{元}/\text{m}^2$); M 为 NPP (gC/m^2); P_3, P_4 分别为固碳价格、制造氧气价格 ($\text{元}/\text{t}$), 见表 1。

(2) 有机质生产功能的价值估算。有机质生产的价值估算采用能量替代法^[29], 即根据碳燃烧产生的热量折算为标准煤的数量, 然后根据标准煤的价格来估算出有机质生产的价值, 公式为:

$$V_4 = \frac{H_c}{H_{\text{coal}}} \cdot M \cdot P_{\text{coal}} \quad (15)$$

式中: V_4 为有机质生产价值 ($\text{元}/\text{m}^2$); M 为 NPP (gC/m^2); H_c 为碳的热值: 0.036 (MJ/g) ; H_{coal} 为标准煤的热值: 0.02927 (MJ/g) ; P_{coal} 为标准煤的价格, 见表 1。

(3) 营养物质循环功能的价值估算。欧阳志云等^[30] 的研究表明, 生态系统每固定 1 g 碳, 就可以积累氮 0.025426 g , 磷 0.00201 g , 钾 0.01012 g , 利用影子价格法算出营养物质循环价值, 其公式为:

$$V_5 = M \times \left(\frac{0.025426}{R_1} \times P_1 + \frac{0.00201}{R_2} \times P_1 + \frac{0.01012}{R_3} \times P_2 \right) \times 10^6 \quad (16)$$

式中: V_5 为营养物质循环价值 ($\text{元}/\text{m}^2$); M 为 NPP (gC/m^2); R_1, R_2, R_3 分别为 N, P 折算为磷酸二铵的系数、K 折算为氯化钾的系数, 分别为: 14%, 15.01%, 50%; P_1, P_2 为磷酸二铵化肥、氯化钾肥的市场价格 ($\text{元}/\text{t}$)。

2.2.3 基于水源涵养量的水源涵养功能生态价值估算
水源涵养价值采用影子工程法依据水库建设单位库容投资以及水的净化费用价格进行计算^[31], 其公式为:

$$V = V_{\text{water}} \times (P_k + P_w) \times 10^6 \quad (17)$$

式中: V 为水源涵养价值 ($\text{元}/\text{m}^2$); W_{water} 为水源涵养量 (mm); P_k 为建设单位库容价格 ($\text{元}/\text{m}^3$); P_w 为净化水质价格 ($\text{元}/\text{m}^3$), 见表 1。

3 结果与分析

3.1 各项生态服务功能价值月际变化分析

岷江上游单位面积生态价值年内变化显著, 其变化的主要影响因素包括光照、降雨、温度以及植被生长周期等。本小节主要分析各项生态系统功能在不同月份的变化情况。由于岷江上游 $>85\%$ 的降雨都集中在 5—10 月份, 同时该时间段也是植被的生长

季,因而 5 种生态服务功能的价值几乎全集中在 5—10 月份,因此本研究针对 2003 年,2007 年,2013 年三年 5—10 月份每个月份的平均值进行生态系统服务功能价值月际变化分析。

表 1 生态系统服务功能价值评估参数表

项目	价格	项目	价格
水库建设单位库容投资/(元·m ⁻³)	6.11	氯化钾化肥价格/(元·t ⁻¹)	2200
水的净化费用/(元·m ⁻³)	2.09	固碳价格/(元·t ⁻¹)	1200
挖取土方费用/(元·m ⁻³)	12.6	制造氧气价格/(元·t ⁻¹)	1000
磷酸二胺化肥价格/(元·t ⁻¹)	2400	标准煤价格/(元·t ⁻¹)	354

注:引自《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008 年)。

由表 2 可得:各生态服务功能的单位面积价值在 10 月份达到最小值;单位面积土壤保育价值在 8 月份达到最大值,为 0.426 元/m²,其次是 7 月份,为 0.376 元/m²,最小为 10 月份(0.095 元/m²),7 月、8 月份单位面积土壤保育价值远大于其他月份,主要原因在于岷江上游在 7 月、8 月份多暴雨,而此时的植被长势较好,植被通过根系对土壤产生固结作用,提高土壤的稳定性,还能通过截留降水和阻碍地表水的冲刷进而直接保护地表,降低土壤侵蚀量,因此在这两个月,土壤的保持量比较大;单位面积水源涵养价值最大值同样出现在 8 月份,为 0.485 元/m²,而且单位面积水源涵养价值在 7—9 月份变化呈现先增加后减小趋势,分别为 0.256 元/m²,0.485 元/m²,0.158 元/m²,其主要原因在于虽然 7 月、8 月份的降雨量较大,但 8 月份相比 7 月份,多阴雨天,太阳辐射较少,导致蒸散量较小,因而水源涵养量较大;而基于 NPP 的固碳释氧、有机质生产以及营养物质循环单位面积生态价值则均在 7 月份达到最大值,分别为 0.39 元/m²,0.024 元/m²,0.028 元/m²,主要原因在岷江流域在 7 月份雨水和光照比较充沛,温度适宜,因此植被光合作用比较强,累积的有机物质(NPP)较多。

表 2 各项生态服务功能单位面积生态价值月际变化分析

月份	单位面积生态服务价值/(元·m ⁻²)				
	土壤保育	固碳释氧	有机质生产	营养物质循环	水源涵养
5	0.095	0.276	0.017	0.020	0.165
6	0.180	0.360	0.022	0.026	0.233
7	0.376	0.390	0.024	0.028	0.256
8	0.426	0.371	0.023	0.027	0.485
9	0.199	0.238	0.017	0.017	0.158
10	0.032	0.095	0.009	0.007	0.004

3.2 各项生态服务价值年际变化分析

由表 3 可知:岷江上游 2003 年的生态系统服务价值总和为 1 065.96 亿元,2007 年则增长为 1 316.39 亿元,而 2013 年相比 2007 年出现一定程度的减小,为

1 267.18 亿元。近 10 a,岷江上游平均生态系统服务总价值为 1 216.51 亿元:其中固碳释氧价值最大,为 502.69 亿元,占总值的 41.52%;其次为水源涵养价值、土壤保育价值,分别为 326.77 亿元和 319.64 亿元,营养物质循环和有机质生产价值较小,分别为 36.46 亿元和 30.95 亿元。

土壤保育功能价值由 2003 年的 268.37 亿元增长为 2007 年的 340.70 亿元,增长幅度为 72.33 亿元,而 2013 年(349.85 亿元)相比 2007 年,土壤保育价值则出现较小幅度增加(9.15 亿元),其原因在于 2000 年之后政府实行退耕还林、退耕还草政策,林草地得到一定程度的恢复,植被盖度增加,土壤流失量减小,然而 2008 年汶川地震使灾区土壤质地变松散,加上大量植被遭到破坏,造成了土壤保育功能增加幅度减小。2007 年土壤固碳释氧功能价值相比 2003 年(476.46 亿元)增长 46.23 亿元,为 522.69 亿元,而 2013 年则减小为 508.92 亿元。2007 年有机质生产和营养物质循环价值则均比 2003 年增长 2 亿元,而 2013 年则均减少 1 亿元左右,变化幅度较小。2003—2013 年,水源涵养价值的变化幅度最大:相比 2003 年(257.25 亿元),2007 年的水源涵养价值增长幅度为 125.66 亿元,达到 382.91 亿元;然而 2013 年的水源涵养价值则出现较大幅度的减小(42.75 亿元),为 340.16 亿元,其主要原因在于 2003—2007 年岷江上游降水量普遍增加,水源涵养量增大,而 2007—2013 年该区域的降水量减小,而蒸发量加大,造成该流域出现一定程度的干旱,因此水源涵养价值减小。

表 3 2003 年、2007 年、2013 年各项生态系统服务功能价值统计

生态服务功能	生态服务价值/10 ⁹ 元			三期均值/ 10 ⁹ 元
	2003 年	2007 年	2013 年	
土壤保育	268.37	340.70	349.85	319.64
固碳释氧	476.46	522.69	508.92	502.69
有机质生产	29.33	32.18	31.33	30.95
营养物质循环	34.56	37.91	36.92	36.46
水源涵养	257.25	382.91	340.16	326.77
总计	1065.96	1316.39	1267.18	1216.51

3.3 不同县域生态系统服务价值年际变化分析

图 1 和表 4 分析发现,2003—2007 年,岷江上游 5 个县的生态系统服务价值总值均表现为一定程度的增大:松潘县的增加幅度最大,为 76.68 亿元,其中水源涵养功能贡献最大,增长幅度为 44.13 亿元,贡献率达到 57.93%;其次为茂县、汶川县和理县,生态系统服务价值总值增幅分别为 52.53 亿元、46.11 亿元、42.41 亿元;而增幅最小的是黑水县,为 33.11 亿

元。2007—2013 年,5 个县的生态系统服务价值总值均表现为一定程度的减小:其中汶川县减小幅度最大,为 18.42 亿元,其原因在于 2008 年汶川地震及其次生灾害(如滑坡、泥石流、水土流失等)极大地破坏了震区生态系统的结构稳定性,导致各项生态系统服务功能都损坏严重,主要表现为各项生态系统服务功能价值都在减少,其中减少幅度最大的为土壤保育价值,为 8.33 亿元,其贡献率达到 45.22%;其次为松潘县,减小幅度为 12.30 亿元,其中水源涵养功能价值减小幅度最大,达到 9.09 亿元;黑水县、茂县、理县的生态系统服务价值总值减小幅度依次为 8.76 亿元、5.67 亿元、3.88 亿元。2007—2013 年,汶川县各项生态系统服务价值均呈现不

同程度减小,其他各县除土壤保育价值外,其余各项生态系统服务价值均表现为减小趋势。

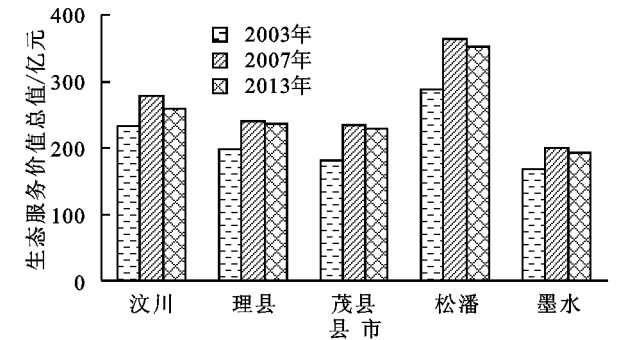


图 1 2003 年、2007 年、2013 年各县生态系统服务价值总值的年度变化

表 4 各县各项生态系统服务价值总值年度变化统计

县市	土壤保育/(10 ⁹ 元)		固碳释氧/(10 ⁹ 元)		有机质生产/(10 ⁹ 元)		营养物质循环/(10 ⁹ 元)		水源涵养/(10 ⁹ 元)	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
汶川	16.61	-8.33	8.52	-6.22	0.52	-0.53	0.62	-0.35	19.84	-2.99
理县	14.79	3.95	6.78	-1.51	0.42	-0.20	0.49	-0.30	19.93	-5.83
茂县	12.31	3.18	12.83	-3.13	0.63	-0.21	0.74	-0.05	28.58	-5.46
松潘	16.39	7.74	9.25	-0.62	0.86	-0.34	1.31	-0.30	44.13	-18.79
黑水	12.25	2.91	6.72	-2.44	0.42	-0.02	0.49	-0.12	13.23	-9.09

注:(1)a 代表 2007 年与 2003 年的差值;(2)b 代表 2013 年与 2007 年的差值;(3)“-”代表减少。

3.4 2003—2013 年生态系统服务价值变化状况分析

为深入分析岷江上游 2003 年、2007 年、2013 年的生态系统服务价值的变化状况,本研究分别将

2003 年、2007 年、2013 年三期岷江上游单位面积生态服务价值做差值运算,并对最终的差值结果进行分级,见表 5。

表 5 生态系统服务价值的变化状况分级

变化级别	剧烈减少区	减少区	轻微减少区	稳定区	轻微增加区	增加区	剧烈增加区
阈值区间	<-2.5 元/m ²	-2.5~1.5 元/m ²	-1.5~0.5 元/m ²	-0.5~0.5 元/m ²	0.5~1.5 元/m ²	1.5~2.5 元/m ²	>2.5 元/m ²

由表 6 分析发现:2003—2007 年,单位面积生态系统服务价值的变化以轻微增加为主,其所占面积百分比为 64.17%,主要分布于茂县、松潘县西部和北部、黑水县南部和西部等;其次是稳定区和增加区,所占面积百分比分别为 15.86%,16.97%,稳定区主要分布于岷江上游西部海拔较高的草地区,增加区则主要集中于汶川县南部的平原地带;而减少区(剧烈减少区、减少区和轻微减少区)分布面积较小,主要集中于高山峡谷地带,该区植被较低,地势陡峻,在密集降雨的冲刷下容易形成大量的滑坡、泥石流,进而造成高强度的土壤侵蚀。总体上,2007 年单位面积生态服务价值相对于 2003 年表现为较大程度的增加。

2007—2013 年,岷江上游单位面积生态服务价值稳定区所占面积最大,其面积比例为 69.44%,主要分布于松潘县北部、黑水县西部和北部以及茂县西部等。其次为轻微减少区 17.95%,主要分布在岷江干流和支流两岸的坡度较陡的林区,由 NDVI 数据可发现该区域 2 013 的 NDVI 值普遍比 2003 年和 2007 年小,主要是因为 2008 年的汶川地震导致的坡度较陡地区的植

被遭到大量破坏,而且 2013 年与 2007 年相比存在 1 个显著的剧烈减少区,即地震重灾区汶川县东南部地带,其剧烈减少面积达到 268.5 km²,该地区由于地震的发生,山体滑坡、泥石流严重,大面积森林植被遭到破坏。2007—2013 年,轻微增加区、增加区以及剧烈增加区三者面积比例之和不足 10%,说明 2013 年相比 2007 年单位面积生态服务价值有一定程度减少。

2003—2013 年,总体上岷江上游单位面积生态服务价值表现为较大程度的增加:其中轻微增加区分布面积最广,为 12 865 km²,主要分布于理县中部和南部、汶川县西部、茂县西部和松潘县中部和东部,其原因在于近十几年该地区降水表现为增加趋势,加上政府实施的退耕还林、退耕还草工程,使该地区的森林和草地面积得到一定程度的恢复;其次为稳定区,所占面积为 7 000.31 km²,多集中于黑水县和松潘县西部,其原因在于该区人类活动强度较小,对区域生态系统干扰度较低;而剧烈减少区和减少区分布面积最小,主要集中于汶川地震灾区,这主要于地震及其次生灾害对生态系统造成较大程度的破坏有关。

表 6 2003 年、2007 年、2013 年生态系统服务价值变化状况分析

变化状况分级	2003—2007 年		2007—2013 年		2003—2013 年	
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
剧烈减少区	1.13	0.00	268.50	1.10	36.50	0.15
减少区	13.25	0.05	733.69	3.01	117.69	0.48
轻微减少区	249.81	1.03	4371.87	17.95	591.13	2.43
稳定区	3864.50	15.86	16915.80	69.44	7000.31	28.73
轻微增加区	15634.80	64.17	1773.19	7.28	12865.00	52.81
增加区	4135.12	16.97	266.38	1.09	3301.69	13.55
剧烈增加区	464.69	1.91	32.44	0.13	450.13	1.85

4 结论与讨论

(1) 从各项生态系统服务功能价值的月际变化(5—10 月份)规律来看,各项生态系统服务价值均在 10 月份达到最小值,土壤保育价值和水源涵养价值在 8 月份达到最大值,而基于 NPP 的固碳释氧、有机质生产和营养物质循环价值则在 7 月份达到最大值。

(2) 2003—2013 年,岷江上游生态服务价值总值呈现先增加(2003—2007 年)后减小(2007—2013 年)的趋势。近十年岷江上游平均生态系统服务总价值为 1 216.51 亿元,其中固碳释氧价值最大,占总值的 41.52%,其次为水源涵养价值和土壤保育价值,分别占总值的 26.69%,26.62%,而营养物质循环和有机质生产价值最小,两者之和占价值总值的 5.56%。

(3) 不同县域生态系统服务价值年际变化上:2003—2007 年,松潘县的生态服务价值总值增加幅度最大,而黑水县变化最小;2007—2013 年,各县的生态服务价值总值均表现为一定程度的减小,其中汶川县的减小幅度最大,这与汶川地震及其次生灾害相关。

(4) 在单位面积生态服务价值年际变化强度上:2007 年单位面积生态服务价值相对于 2003 年呈现较大程度增加,而 2013 年比 2007 年的单位面积生态服务价值有所减少。

岷江上游林地相对于其他土地利用类型具有较高的土壤保持,净初级生产以及水源涵养能力,可以更好地来改善小气候环境。因此,增加岷江上游森林覆盖面积是提高生态价值的关键,特别是加强岷江上游流域干旱河谷大于 25°坡耕地的退耕还林、还草工程的实施。草地主要分布于气候寒冷的高山区,由于全球气候变暖以及过度放牧导致了该区草地的严重退化,极大的降低了该流域的生态系统服务价值,因此应根据草地的产量,草种的构成,长势以及水源状况来确定合理的载畜量以及放牧间隔时间,并依据气候条件选择不同的优势草种来因地补种退化的草地。

岷江上游生态系统服务价值时空格局变化的驱

动力主要包括自然因素(如地震、滑坡、泥石流、植被变化、气候的波动等)和人为经济因素(如毁林毁草、耕地的过度利用、落后的农耕措施以及不合理的经济产业结构等)。岷江上游生态服务功能的改善可以减轻中下游的水土流失,有利于农田的保护,对于中下游地区的经济可持续发展具有重要意义,因此应对上游居民做好生态补偿,以提高保护生态环境和增加生态服务价值的积极性。

参考文献:

[1] Tallis H, Kareiva P. Ecosystem services[J]. Current Biology, 2008,15(18):746-748.

[2] Grêt-Regamey A, Bebi P, Bishop I D, et al. Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region[J]. Journal of Environmental Management, 2008,89(3):197-208.

[3] David P, Turnera, William D, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,102:282-292.

[4] Williams J R, Jimmy R. Modeling soil nutrient limitations to crop production in semiarid NE of Brazil with a modified EPIC version: II :Field test of the model[J]. Ecological Modeling, 2008,181(4):567-580.

[5] Fang Y P, Qin D H, Ding Y J, et al. The impacts of permafrost change on NPP and implications: A case of the source regions of Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Mountain Science, 2011,8(3):437-447.

[6] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5):912-919.

[7] 崔敬涛,吴国平,马庆申,等. 基于 RS 和 GIS 的费县生态服务价值的研究[J]. 农业科学与技术,2013,14(8):1171-1173.

[8] 刘强,赵新生,叶茂,等. 玛纳斯河流域生态系统服务功能价值研究[J]. 新疆环境保护,2013,32(4):1-6.

[9] 伍星,沈珍瑶,刘瑞民,等. 土地利用变化对长江上游生态系统服务价值的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(8):236-241.

[10] 王璐,杨洁,胡月明,等. 广州市土地利用生态服务价值

- 测算研究[J]. 水土保持通报, 2009, 28(4): 229-234.
- [11] 封建民, 郭玲霞. 陕西省神木县土地利用格局和生态服务价值变化[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 293-298.
- [12] 孙慧兰, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究[J]. 中国沙漠, 2008, 22(9): 14-17.
- [13] 李琳, 林慧龙, 高雅. 三江源草原生态系统生态服务价值的能值评价[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 34-41.
- [14] 任朝霞, 陆玉麒. 条件价值法在西安市耕地资源非市场价值评估的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(3): 28-32.
- [15] 徐大伟, 荣金芳, 李亚伟, 等. 生态补偿标准测算与居民偿付意愿差异性分析: 以怒江流域上游地区为例[J]. 系统工程, 2015, 33(5): 81-88.
- [16] 唐建, 沈田华, 彭珏. 基于双边界二分式 CVM 法的耕地生态价值评价: 以重庆市为例[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 207-215.
- [17] 何勇. 基于 CVM 的岷江上游森林生态系统服务价值评估[J]. 现代农业科技, 2012, 19(3): 143-145.
- [18] 任志远, 刘焱序. 西北地区植被净初级生产力估算模型对比与其生态价值评价[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(4): 494-502.
- [19] 韩维栋, 黄剑坚, 李锡冲. 雷州半岛红树林湿地的生态价值评估[J]. 泉州师范学院学报, 2012, 30(4): 62-66.
- [20] 刘琦, 明博. GIS 支持下生态系统土壤保持生态价值评估: 以太原市城区及近郊区为例[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 456-460.
- [21] 杨悦, 李建龙, 李辉, 等. 宜兴市生态资源价值的定量评估与分析[J]. 宁夏大学学报, 2015, 36(3): 1-7.
- [22] 齐述华, 蒋梅鑫, 于秀波. 基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2015 年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1197-1203.
- [23] 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 275-284.
- [24] 钞振华, 张培栋, 王旭峰. 近 10 年来山东区域 NPP 时空变化分析[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 829-835.
- [25] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [26] 文华英, 黄义雄, 张巧森, 等. 海坛岛沿海防护林森林生态系统间接经济价值评估[J]. 防护林科技, 2013, 134(11): 11-14.
- [27] 王举位, 张征, 安宝利. 砭砂岩区沙棘林生态服务功能价值评估[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 198-204.
- [28] 伍格致, 周妮笛. 湖南省森林碳储量及其经济价值测算研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(8): 127-132.
- [29] 刘东, 黄海清, 李艳. 浙江省森林生态服务价值估算及其逐月变异分析[J]. 地球信息科学, 2014, 16(2): 225-232.
- [30] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [31] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2100-2109.

~~~~~

(上接第 130 页)

- [22] Hagemann S, Chen C, Haerter J O, et al. Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models[J]. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(4): 556-578.
- [23] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data[C]// ACM National Conference. ACM, 1968: 517-524.
- [24] Watson D F. A refinement of inverse distance weighted interpolation[J]. Geo-Processing, 1985, 2: 315-327.
- [25] 曾红伟, 李丽娟, 张永萱, 等. 大样本降水空间插值研究: 以 2009 年中国年降水为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818.
- [26] 李正泉, 吴尧祥. 顾及方向遮蔽性的反距离权重插值法[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 91-98.
- [27] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1/4): 144-150.
- [28] Yu Y S, Zou S, Whittemore D. Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1993, 150(1): 61-80.
- [29] Kahya E, Kalayci S. Trend analysis of streamflow in Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2004, 289(1/4): 128-144.
- [30] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 752-760.