

基于自然和社会要素影响的清江流域生态系统服务研究

范昕¹, 张璐², 李江风¹, 宋鄂平³, COULIBALY Lenikpoho Karim⁴, EME Chan⁴, 杨青⁵, 贾儒⁵

- (1. 中国地质大学(武汉) 公共管理学院, 湖北 武汉 430074;
2. 中国地质大学(武汉) 艺术与传媒学院, 湖北 武汉 430074;
3. 湖北民族大学 林学与园艺学院, 湖北 恩施 445000;
4. 中国地质大学(武汉) 丝绸之路学院, 湖北 武汉 430074;
5. 恩施市足协, 湖北 恩施 445000)

摘要: 清江流域生态系统作为湖北西南山区重要的生态屏障, 对山地城镇的发展具有重要意义。为反映清江流域生态系统服务价值的空间异质性, 运用加权求和法、层次分析法和区位熵法分析并归因。结果表明: (1) 清江流域生态风险源分布在人口密集的中下游流域, 受洪涝、干旱、塌荒等地质灾害影响较大, 应降低灾害风险对生态系统造成的影响; (2) 研究区生态环境与经济分布不协调, 其中恩施市等经济发展水平与植被覆盖率较高, 巴东县等经济发展水平与植被覆盖率最低; (3) 研究区总生态系统服务价值为 3.96×10^6 万元, 流域内生态系统服务价值分布与土地面积表现为不协调。研究结果为政府决策者在实施可持续发展战略提供科学合理的依据。

关键词: 生态系统服务价值; 加权求和法; 层次分析法; 区位熵法; 清江流域

中图分类号: X196; X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2021)01-147-05

Study on the Ecological System Service of Qing River Basin on the Basis of Natural and Social Factors

FAN Xin¹, ZHANG Lu², LI Jiangfeng¹, SONG Eping³, COULIBALY Lenikpoho Karim⁴, EME Chan⁴, YANG Qing⁵, JIA Ru⁵

- (1. School of Public Administration, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China;
2. School of Art and Media, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China;
3. School of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi Hubei 445000, China;
4. Silk Road Institute, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China;
5. Enshi Football Association, Enshi Hubei 445000, China)

Abstract: As an important ecological barrier in the southwestern mountainous area in Hubei, the ecological system of Qing River basin is of great significance to the urban development in mountainous area. In order to reflect the spatial heterogeneity of Ecosystem Service Value (ESV) per unit area in Qing River basin, this paper investigates the natural and social factors that affect the ESV with weighted sum method, analytic hierarchy process (AHP) and location quotient (LQ). The results show that: (1) The ecological risk source of Qing river valley are mainly distributed in middle and lower reaches of densely populated areas, which are greatly affected by flood, drought, collapse and other geological disasters, and the impact of disaster risk on ecosystem should be reduced; (2) The ecological environment and economic distribution in the study area are not harmonious. The economic development level and the vegetation coverage rate of Enshi City and Changyang County are higher, and the economic development level and the vegetation coverage rate of Badong County, Hefeng County and Wufeng County are the lowest. (3) The total ESV of the study area is 39.6 billion, and the distribution of ESV in the basin was the opposite of the land area distribution. The research results provide scientific and reasonable basis for government decision makers in the process of the future implementation of sustainable development strategy.

Key words: ecosystem service value; weighted sum method; analytic hierarchy process; location quotient; Qing River basin

生态系统服务功能是生态系统及其生态过程所形成的有利于人类生存发展的生态环境条件与效用。美国的生态学家 Daily^[1] 最早于 1976 年提出了美国生态区域分类系统, 并且按照不同行政单元对生态区划进行了真正

第一作者简介: 范昕, 博士研究生, 研究方向为资源环境、区域经济。E-mail: fanfx8@vip.qq.com

通讯作者简介: 李江风, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为土地利用规划、国土资源调查评价及地质公园规划。E-mail: jfli0524@163.com

意义上的分类。国内外生态学者对生态区划的研究原则、指标确权和研究方法等进行了大量讨论,同时基于尺度的大小对生态功能进行了区划分析^[2-3]。关于生态系统服务价值的测算方法多样,通过查阅研究文献发现国际上引用较多的是 Costanza 等^[4]1997 年在 *Nature* 杂志上发表的关于全球生态系统服务价值(ESV)和生态资本的文献,而国内关于生态系统服务研究较多的是谢高地等^[5-6]关于中国陆地生态系统单位面积 ESV 当量表;周永娟等^[7]、欧阳志云等^[8]对中国生态系统服务功能进行宏观阐述,接着许多学者从各种尺度对 ESV 进行了研究^[9-12]。在 ESV 的定性和定量研究方面,影响最大的欧阳志云等^[13]对内陆流域 ESV 进行的一系列测度方法。然而,时至今日该研究仍然受到行政界限的限制,其结果难以以行政区为基础单元来统计社会经济数据,从而不利于各级政府决策者进行生态系统管理及实施。

本文对众多研究者的结果进行总结,发现有以下几点不足:首先,在研究 ESV 时往往忽略同一类型生态群落的空间异质性状态,如同一生态系统土地利用与土地覆被(LUCC)在空间上的分布差异,而且对区域生态系统的分类标准、生态脆弱性和敏感性等的研究不足,仅有李博等^[14]、栗晓玲等^[15]在研究清江流域和西北地区石羊河流域的 ESV 时分析了研究区生态脆弱性和敏感性的影响,但是没有明确行政单元界限,其研究结果的可信度不足;其次,生态系统服务中自然资本的价值和服务的稀缺程度、经济社会发展以及生态系统的依赖程度等具有多种因素,导致 ESV 的测度和计算方法多样^[16];最后,许多专家学者分别从不同角度对 ESV 的时空变化进行了研究探讨,但往往只从单因子变量或者关键因子变量进行分析研究^[17],而很少从自然及人文因素对 ESV 的影响进行研究探讨。鉴于此,本文在借鉴前人研究的基础上提出了新的研究方法,分析了清江流域 2000—2015 年 ESV 的时空变化。同时依托国家“十三五”规划战略决策,以县(市)为基础单元,提出了影响清江流域 ESV 的生态系统分类、评价指标、生态环境敏感性等^[18-19],依据区划原则、方法和体系,形成了县域尺度 ESV 的测算方法。

1 研究区概况

1.1 研究区概况

清江流域位于湖北西南部(108°35' ~ 111°35'E,

29°33' ~ 30°50'N)。发源于湖北西南隆都亭山利川齐岳山以西的庙湾,自西向东流经上游流域(利川市、宣恩县、咸丰县),中游流域(恩施市、建始县、巴东县、鹤峰县)和下游流域(长阳县、五峰县、宜都市)10 个县(市),在宜都市陆城镇注入长江。从生态环境治理来看,研究区作为湖北西南贫困地区,立足以保护生态环境,合理开发和利用资源,以经济建设为中心是清江流域发展首选。然而,发展要走可持续发展之路,从生态环境与经济协调发展中发挥 ESV 作用,加快生态旅游建设,使经济发展与生态环境保护平衡发展。但是,清江流域在发展生态旅游时,面临各种威胁与挑战,如耕地、林地产出率降低,而且近年来政府鼓励开荒种植经济林,造成农业用水污染、水土流失等,成为典型的生态环境高危区^[20]。

1.2 数据来源及处理

本研究的土地利用数据源于中国科学院地理科学与资源研究所研发的全国多时相土地利用现状数据库(<http://www.resdc.cn/>),采用《土地资源现状分类》(GB/T21010—2017)、《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008)分类体系,综合研究区土地里利用实际与研究目标需要,本文确定地类为水田、旱地、有林地、灌木林地、园地、草地、湿地、水系、其他用地;社会经济指标数据来源于《中国县域统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 引入ESV修正系数及加权求和模型

本文根据国家《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008)及土地利用类型分类规范对研究区耕地、林地、草地和其他用地等进行了二级分类(表 1)。同时引入 ESV 修正系数^[14],将生态系统类型单位面积的 ESV 乘以修正系数,得到研究区二级生态群落单位面积 ESV。并引入加权求和经验模型,以反映同一个二级生态群落在不同时段单位面积 ESV 的空间差异性,体现其空间异质性^[6,11],模型表示为:

$$ESV = \sum_i^n \sum_j^m A_{ij} K_{ij} V_j \pi_{ij} \eta_i \quad (1)$$

式中: A_{ij} 表示第 i 单元第 j 类生态群落的面积值; K_{ij} 表示第 i 类一级生态群、第 j 类二级生态群落的单位面积 ESV 的修正系数; V_j 表示第 j 类生态群落单位面积生态系统修正前的服务价值; π_{ij} 示第 i 单元第 j 类生态群落的自

表1 清江流域生态系统单位面积ESV

单位:元/公顷

一级生态群	耕地		林地			草地		水系	其他用地
	水田	旱地	有林地	灌木林地	园地	草地	湿地		
二级生态群									
单位面积 ESV	6 114.30	3 342.25	29 001.01	15 476.20	23 200.80	9 609.75	7 047.15	34 574.25	547.01

然条件差异系数值； η_i 为第 i 单元的社会发展差异系数值。

2.2 确定生态系统影响要素

本文以清江流域自然和社会区位影响要素为基础，对 ESV 进行综合测算。

2.2.1 生态系统灾害风险源及权重确定

根据 2000—2015 年湖北省环境监测中心的统计资料显示，清江流域灾害风险源频次最高为水土流失、水灾和石漠化。水土流失范围以植被石漠化、坡度大于 25° 的地区为准；水灾以当年洪涝灾害超过预警值为准；石漠化以湿地、荒漠化土地为准，共同构成灾害风险源。本文的生态风险源分为三级，采用层次分析法(AHP)对受灾害影响权重进行综合分析，同时根据研究区风险类型的发生频率、发生强度以及危害程度进行系统分析^[20]。首先，确定不同行政单元同一灾害源的灾害影响指数，计算灾害权重值；其次，通过二者乘积求得综合灾害风险指数值(R_i)。由于行政单元之间的风险源存在差异性，计算时需要通过 ArcGIS10.0 进行迭代计算^[14]，公式如下：

$$R_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} \times w_j \quad (2)$$

$$NEI_{ij} = R_i \times EDI_{ij} \quad (3)$$

式中： R_i 表示 i 单元的综合灾害影响指数； r_{ij} 表示 i 单元 j 类灾害影响指数； w_j 表示研究区 j 类灾害风险权重值； NEI_{ij} 表示 i 单元 j 类生态系统综合灾害风险指数值； EDI_{ij} 表示 i 单元 j 类生态系统的生态损失度指数值^[21] (表 2)。

2.2.2 生态系统社会区位要素分析

本部分通过 SPSS21.0 进行统计及相关分析，从定性和定量的方法分析行政单元之间经济差异与单位面积生态系统之间的相关性。首先，为了更好地体现行政单元之间差异系数，引入区位熵分析方法，其方法是根据单元之间综合实力和自然资源的配置结果考察二者的优势，并按照经济和自然影响因子在某一特定单元的相对集中程度，来判断该单元在研究区内具有的优势；其次，通过提取行政单元的经济实力、基础设施、生态环境和社会发展 4 个一级指标、15 个二级指标对行政单元的区位优势进行综合评价；最后，将原始数据值进行归一化处理并消除量纲的影响，便于计算综合实力值。分析结果显示：Cronbach α 系数值为 0.99，KMO 系数值为 0.96；指标 Bartlett 球形度检验中，卡方值为 1 137.47，自由度

为 0.00，旋转成分矩阵显示指标负荷值介于 0.57 ~ 0.95，因子排列整齐，累计方差贡献率达 100%，结果表明 15 个指标适合做因子分析^[22]，公式为：

$$LQ_i = \left(\frac{Q_i}{Q}\right) \div \left(\frac{VC_i}{VC}\right) \quad (4)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^m [p_k \times \sum_{j=1}^n (C_{kj} \times M_{ij})] \quad (5)$$

式中： LQ_i 表示 i 单元的区位熵； Q_i 表示 i 单元的综合实力值； Q 表示研究区的综合实力值； VC_i 表示 i 单元的植被覆盖率； VC 表示清江流域植被覆盖率； m 表示特征值大于 1 的主成分个数； p_k 表示主成分 k 的贡献率； C_{kj} 表示主成分 k 在指标 j 上的载荷； n 表示综合评价指标个数； M_{ij} 表示行政单元 i 指标 j 的标准化值(表 3)。

表3 区位综合实力指标权重统计

一级指标	权重	二级指标	权重	综合权重
经济实力	0.33	地区生产总值	0.37	0.12
		人均 GDP	0.15	0.05
		地区财政支出	0.25	0.08
		生态扶贫金额	0.23	0.08
基础设施	0.21	人均淡水资源面积	0.24	0.05
		人均耕地面积	0.32	0.07
		人均林地面积	0.23	0.05
		人均粮食产量	0.21	0.04
生态环境	0.27	干旱灾害次数	0.45	0.12
		洪涝灾害次数	0.28	0.08
		滑坡灾害次数	0.27	0.07
社会发展	0.19	人均科教文卫事业比重	0.27	0.05
		废物处理量	0.22	0.04
		人均娱乐文化设施	0.14	0.03
		居民幸福指数	0.37	0.07

2.3 生态系统综合测算方法

2.3.1 区位自然因子和社会影响要素定量分析

为了减小 ESV 的误差，本文首次引入自然差异系数^[23] 和社会差异系数^[24]。自然差异系数主要是自然区位条件的不同而导致自然灾害指数差异，进而引起三个河段单位面积的 ESV 具有空间异质性特征；社会差异系数主要体现了三个河段地理条件不同，各行政单元之间的经济发展也具有异质性特征，导致 ESV 的计算结果具有差异性。基于此，本文引入公式：

$$\begin{cases} \pi_{ij} = \frac{NEI_{ij}}{NEI_j} \\ \eta_i = LQ_i \end{cases} \quad (6)$$

$$NEI_j = \left(\sum_{i=1}^3 NEI_{ij}\right) \times area_j \quad (7)$$

表2 综合生态灾害风险指数

区域	水田		旱地		有林地		灌木林地		园地		草地		湿地		水系		其他用地	
	R	EDI	R	EDI	R	EDI	R	EDI	R	EDI	R	EDI	R	EDI	R	EDI	R	EDI
上游流域	0.05	0.03	0.06	0.05	0.43	0.19	0.24	0.28	0.18	0.31	0.02	0.24	0.11	0.33	0.13	0.05	0.29	0.17
中游流域	0.18	0.07	0.21	0.08	0.31	0.21	0.19	0.29	0.05	0.33	0.07	0.27	0.09	0.36	0.11	0.08	0.17	0.19
下游流域	0.18	0.06	0.22	0.08	0.34	0.21	0.08	0.29	0.07	0.33	0.06	0.28	0.08	0.36	0.11	0.09	0.24	0.21

并且行政单元的自然因子与社会须满足以下条件：

$$1/n \sum_{i=1}^n \pi = 1, 1/n \sum_{i=1}^n \eta = 1 \quad (8)$$

式中： π 表示各个单元的自然条件差异系数； NEI_{ij} 表示 i 河段第 j 个生态风险区归一化值； η 表示各个单元社会发展差异系数^[25]； LQ_i 表示研究区 i 河段的区位熵； $area_j$ 表示 j 类生态系统面积比重。

2.3.2 基于ESV假设计量算法

为定量分析影响要素与ESV的数理关系^[26]，假设ESV仅受自然因子和社会要素的影响，基于假设建立空间计量模型：

$$E_{ij} = \pi_{ij} K_{ij} V_j \eta_i \quad (9)$$

式中： E_{ij} 表示 i 单元 j 类生态系统单位面积ESV； V_j 为研究区 j 类生态系统单位面积ESV； π_{ij} 为第 i 单元第 j 类生态系统的自然差异系数^[14]； η_i 为第 i 单元社会发展差异系数。将式(10)代入式(1)即得：

$$ESV = \sum_i^3 \sum_j^9 A_{ij} E_{ij} \quad (10)$$

3 结果与分析

3.1 风险源与生态系统关系

根据公式(2)~(3)计算结果显示，一级生态风险区的地质环境情况复杂多变，地势险峻，滑坡、泥石流等灾害频发，导致该地区生态系统抵抗自然灾害与人类干扰的能力较差，应该呼吁当地人们避免在此进行大规模的生产劳动，减少因灾害而造成的影响；二级生态风险区分布与一级风险区相连，主要分布在中上游地区，约占研究区总面积的33.68%，植被类型主要以林地和耕地为主，风险源主要来自洪涝、泥石流的影响，加上夏季降水集中、洪水频发，使得经济林地容易遭到雨水冲刷；三级生态风险区主要分布在中游的恩施市、巴东县以及下游的五峰县等，多为人口密集，植被类型的分布多样，其灾害风险源主要受洪涝、水土流失的影响。因此，当地政府在发展生态农业时，应该降低灾害风险源对生态系统造成的影响，加强一级、二级、三级生态风险区的联动作用，共同抵御因灾害造成的经济损失。

3.2 研究区综合实力分析

根据公式(4)~(5)计算结果显示，清江流域植被覆盖度与区域综合实力的空间分布存在异质性特征。将ESV的计算结果进行归一化处理，发现生态环境与研究区各个单元之间的经济分布不协调，出现三种分布状态： LH （行政单元内经济发展水平比较低，而植被覆盖度比较高）； HL （行政单元内经济发展水平较高，而植被覆

盖度较低）； HH （行政单元内经济发展水平与植被覆盖度均比较高）。其中， LH 现象主要出现在上游流域，因为清江上游存在大量水源涵养林，加之地形、交通区位和人类活动较少等因素限制区内农业生产和工业的发展规模； HL 现象主要出现在中游流域，原因是中游流域存在大量经济林，但是大量的工业企业和人口分布密集，经济的快速发展使得区内综合实力得到快速提升，导致脆弱的生态环境有待政府部门加快政策扶持力度，并实施可持续发展战略步伐；出现 HH 现象的是下游流域，其中以宜都市最为典型。宜都市地处清江下游流域，由于近年来上游流域生态环境不断改善，中游流域发展生态农业，生态扶贫政策贯彻较好，推动了下游流域经济稳步提升，生态环境改善明显(表4)。

表4 清江流域区位综合实力统计

区域	区位综合实力		植被覆盖率		区位条件差异系数	
	归一化前	归一化后	归一化前	归一化后		
上游流域	利川市	2.90	0.64	0.90	0.96	0.31
	咸丰县	1.56	0.35	0.94	1.00	0.31
	宣恩县	1.33	0.30	0.91	0.97	0.31
中游流域	恩施市	4.50	1.00	0.88	0.94	0.31
	建始县	1.84	0.41	0.86	0.91	0.31
	鹤峰县	1.28	0.28	0.85	0.90	0.31
下游流域	巴东县	1.92	0.43	0.92	0.92	0.31
	长阳县	2.93	0.65	0.91	0.92	0.38
	五峰县	1.12	0.55	0.88	0.93	0.38
	宜都市	3.27	0.73	0.86	0.91	0.38

3.3 ESV的测算结果

依据公式(6)~(8)计算结果显示，研究区二级生态群落受自然条件的影响，上游地区的林地、耕地和草地的生态敏感性较强，生态系统抗干扰能力较差，应该大力培育水源涵养林，固化土壤，增加生态扶持力度。根据公式(9)计算结果显示，2000—2015年LUCC（土地利用与土地覆被）植被覆盖度明显改善(图1)，上游、中游和下游流域的单位面积ESV存在异质性。不同行政单元同一生态系统单位面积ESV差异较大；从LUCC（土地利用与土地覆被）尺度看，林地、耕地生态系统单位面积ESV差异最大，而湿地、水系变化最小(表5)。

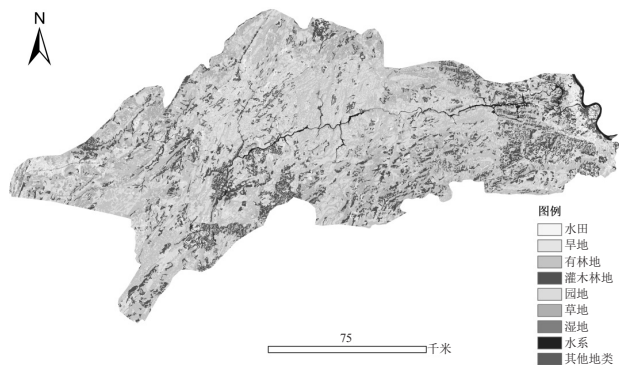


图1 2015年LUCC（土地利用与土地覆被）空间分布

表5 2015年单位面积ESV当量

单位：元/公顷

区域	水田	旱地	有林地	灌木林地	园地	草地	湿地	水系	其他用地
利川市	1 395.28	2 001.53	28 340.48	14 769.44	1 753.44	2 245.06	405.45	572.88	60.73
咸丰县	1 280.78	915.38	12 961.26	6 754.67	801.92	1 026.76	185.43	262.00	27.78
宣恩县	588.24	2 978.59	42 175.09	21 979.25	2 609.40	3 341.00	603.37	852.53	90.38
恩施市	1 252.56	1 278.87	18 108.06	9 436.89	1 120.36	1 434.47	259.06	366.04	38.80
建始县	101.24	512.64	7 258.73	3 782.84	449.10	575.02	103.85	146.73	15.55
鹤峰县	1 399.08	2 020.81	28 613.41	14 911.67	1 770.33	2 266.68	409.35	578.39	61.32
巴东县	1 358.86	1 817.15	25 729.71	13 408.85	1 591.91	2 038.24	368.10	520.10	55.14
长阳县	1 279.42	1 414.86	20 033.60	10 440.37	1 239.49	1 587.01	286.61	404.96	42.93
五峰县	1 329.10	1 666.42	23 595.57	12 296.66	1 459.87	1 869.18	337.56	476.96	50.56
宜都市	2 395.28	2 001.53	28 340.48	14 769.44	1 753.44	2 245.06	405.45	572.88	60.73

通过公式(10)计算结果显示,研究区2015年ESV为 3.96×10^6 万元,占清江流域国民生产总值的61.52%。流域内ESV分布与土地面积分布相反,上游、中游、下游土地面积比例为31.65%、35.49%和22.76%,而ESV分布为23.82%、48.99%和27.19%(表6)。从分布结果看,以恩施市为中心的中游和以宜都市为中心的下流占据了ESV总数的76.18%,表明研究区经济中心仍然在中下游地区,上游流域属于资源输出型地区,三者之间的生态资源可以相互转移,实现供求平衡,以便建立有利于植被资源用途转移的成本核算框架,减少生态补偿而造成的资源损失。

表6 生态系统ESV测算结果

单位: 10^6 元

区域	水田	旱地	有林地	灌木林地	园地	草地	湿地	水系	其他用地	
上游流域	利川市	1.85	1.95	17.77	12.91	6.16	6.15	1.20	2.04	0.12
	咸丰县	0.88	0.88	8.01	5.86	2.79	2.79	0.55	0.92	0.05
	宣恩县	0.82	0.85	7.72	5.66	2.39	2.69	0.53	0.89	0.05
中游流域	恩施市	2.51	3.51	21.81	19.9	19.98	7.94	1.56	2.62	0.15
	建始县	1.21	1.91	10.91	19.31	3.87	3.8	0.75	1.26	0.07
	鹤峰县	0.52	4.23	4.74	3.48	1.65	1.65	0.33	0.55	0.03
下游流域	巴东县	1.87	1.57	17.01	17.46	5.92	5.92	1.17	1.96	1.14
	长阳县	1.56	1.56	14.18	11.64	4.94	4.94	0.97	1.64	0.95
	五峰县	1.08	1.38	10.12	9.38	4.36	4.36	0.86	1.45	0.84
宜都市	1.12	4.12	9.57	7.16	3.54	3.54	0.70	1.17	0.68	

4 研究结论

(1)从ESV测算来看,研究区经济中心仍然在中下游流域,上游流域属于资源输出型地区,三者之间的生态资源可以实行内部转移,以便建立植被资源用途转移的成本核算体系,减少生态补偿植被资源损失。

(2)本文结合谢高地等^[5-6]、欧阳志云等^[13]和李博等^[14]的成功经验,从自然和社会要素对研究区ESV进行测度,目的是建立具有湖北西南山地结构特点的ESV评价体系,全面认识生态服务价值及提供一个更加高效的利用途径。

(3)本文对研究区ESV测算结果与当地发布的《恩施州清江流域综合利用规划(2011—2020年)》和《清江流域绿色生态经济带发展规划(2014—2020年)》文件中有

关生态环境保护的量化目标基本保持一致,其结果对政府决策者实施可持续发展规划提供科学合理的依据。[2]

参考文献:

[1]Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.

[2]Schultz J. The ecozones of the world: The ecological divisions of the geosphere [M]. Berlitz: Springier-Verlag Press, 1995.

[3]Matthews E. Global vegetation and land use: New high-resolution data bases for climate studies [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(3): 474-487.

[4]Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[5]谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化[J]. 资源科学, 2008 (1): 93-99.

[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 (9): 1740-1746.

[7]周永娟, 王效科, 欧阳志云. 生态系统脆弱性研究[J]. 生态经济, 2009 (11): 165-167.

[8]欧阳志云, 张路, 吴炳方, 等. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系[J]. 生态学报, 2015 (2): 219-226.

[9]傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的, 任务及特点[J]. 生态学报, 1999 (5): 591-595.

[10]Wu H J, Wang X L, Ning L M, et al. Effects of land use change on ecosystem services value—a case study in Wuhan city [J]. Resources and Environment in Yangtze River Basin, 2006, 15(2): 185-190.

[11]Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.

[12]Yu X X, Lu S W, Jin F, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2096-2102.

[13]欧阳志云, 江波, 苗鸿, 等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 生态学报, 2011 (8): 2236-2244.

[14]李博, 石培基, 金淑婷. 清江流域ESV的空间异质性及其计量[J]. 中国沙漠, 2013 (3): 943-951.

[15]粟晓玲, 康绍忠, 佟玲. 内陆河流域生态系统服务价值的动态估算方法与应用——以甘肃河西走廊石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2006 (6): 2011-2019.

(下转184页)

- [2]Doerflinger N, Jeannin P Y, Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method) [J]. *Environmental Geology*, 1999, 39(2): 165-176.
- [3]Gallopín G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 293-303.
- [4]刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. *水土保持通报*, 2002 (2): 41-44.
- [5]于翠松. 环境脆弱性研究进展综述[J]. *水电能源科学*, 2007 (4): 23-27.
- [6]翁建武, 夏军, 陈俊旭. 黄河上游水资源脆弱性评价研究[J]. *人民黄河*, 2013 (9): 15-20.
- [7]Holling C S. Resilience and stability of ecological system [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 21(4): 1-3.
- [8]Comfort L K. Risk and resilience: Inter-organizational learning following the Northridge earthquake of 17 January 1994 [J]. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 1994, 2(3): 157-170.
- [9]于翠松. 山西省水资源系统恢复力定量评价研究[J]. *水利学报*, 2007 (S1): 495-499.
- [10]汪兴玉. 黄土高原典型农村社会一生态系统适应性循环机制及对干旱的恢复力[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [11]商彦蕊, 陈佳飞, 张瑞清, 等. 农业旱灾系统恢复性评价思路与方法——以河北省邢台市为例[J]. *中国生态农业学报*, 2011 (1): 167-171.
- [12]赵丹, 刘东, 武秋晨. 基于DPSIR-TOPSIS模型的区域农业水资源系统恢复力评价[J]. *中国农村水利水电*, 2014 (7): 52-56.
- [13]黄澄. 风景名胜区河流生态系统恢复力研究——泰山西溪河流为例[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [14]丁杨, 刘东, 张永嘉. 黑龙江省农垦建三江管理局区域农业水资源系统恢复力研究[J]. *水电能源科学*, 2017, (11): 26-30.
- [15]龚宇, 王璞, 王聪玲. 基于AHP方法的农业用水资源综合评价与分析[J]. *节水灌溉*, 2007 (4): 31-33.
- [16]刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. *水土保持通报*, 2016 (3): 211-218.
- [17]朱怡娟, 黄建武, 揭毅. 武汉城市圈水资源脆弱性评价[J]. *水资源保护*, 2015 (2): 59-64, 94.
- [18]职璐爽, 薛惠锋. 基于熵权法的城市水资源脆弱性研究——以广东省为例[J]. *水土保持通报*, 2018 (5): 322-329.
- [19]刘晓敏, 刘志辉, 孙天合. 基于熵权法的河北省水资源脆弱性评价[J]. *水电能源科学*, 2019 (4): 33-35, 39.
- [20]宁理科, 刘海隆, 包安明. 塔里木河流域水资源系统脆弱性定量评价研究[J]. *水土保持通报*, 2013 (5): 266-270.
- [21]梁旭, 刘东, 孙建, 等. 区域农业水资源恢复力可变模糊评价模型[J]. *节水灌溉*, 2015 (4): 46-51.
- [22]许东阳, 任永泰, 成琨. 基于动态视角下的区域水土资源生态安全风险评估[J]. *北方园艺*, 2019 (5): 107-115.
- [23]周玲玲, 王琳, 刘伟峰, 等. 基于客观组合赋权法的即墨市水资源可持续利用评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2014 (4): 50-55.
- [24]赵卓. GIS支持下的二松流域水资源系统恢复力评价[D]. 长春: 东北师范大学, 2009.

(责任编辑: 保文秀)

(上接151页)

- [16]Estoque R C, Murayama Y. Landscape pattern and ecosystem service value changes: Implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 116: 60-72.
- [17]Ran S H, Lu C H, Jia K J, et al. Environmental impact assessment of the land use change in China based on ecosystem service value [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(10): 2139.
- [18]王宗明, 张柏, 张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究[J]. *自然资源学报*, 2004 (1): 55-61.
- [19]宋鄂平, 许辉云, 孙毅, 等. 旅游业对恩施经济的拉动效应分析[J]. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, 2013 (3): 338-342.
- [20]徐广才, 康慕谊, 贺丽娜, 等. 生态脆弱性及其研究进展[J]. *生态学报*, 2009 (5): 2578-2588.
- [21]秦年秀, 姜彤. 基于GIS的长江中下游地区洪灾风险分区及评价[J]. *自然灾害学报*, 2005 (5): 1-7.
- [22]顾芾, 周生路, 张红富, 等. 南京市生态系统服务价值时间变化及区域差异分析[J]. *生态学报*, 2009, 28 (3): 497-502.
- [23]官冬杰, 龚巧灵, 刘慧敏, 等. 重庆三峡库区生态补偿标准差别化模型构建及应用研究[J]. *环境科学学报*, 2016 (11): 4218-4227.
- [24]郭晓娜, 苏维词, 李强, 等. 三峡库区(重庆段)地表起伏度及其对生态系统服务价值的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2016 (6): 887-894.
- [25]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[J]. *资源科学*, 2013 (1): 30-41.
- [26]Junaid M, Lapins M, Eklund M, et al. Proteochemometric modeling of the susceptibility of mutated variants of the HIV-1 virus to reverse transcriptase inhibitors [J]. *PloS One*, 2010, 5(12): e14353.

(责任编辑: 张海艳)