文章编号:1672-3031(2020)04-0313-08

基于InVEST模型的赤水河流域生态系统服务功能评估研究

贾婉琳[1], 吴赛男[1], 陈 昂[1,2]
(1. 中国水利水电科学研究院 水电可持续发展研究中心, 北京 100038;
2. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘要: 通过开展流域生态系统服务功能评估, 分析生态系统服务功能时空动态演变趋势, 能够快速识别流域整体健康水平和退化程度, 为流域生态系统保护提供决策依据。本研究采用ArcGIS和Fragstats软件分析了赤水河流域1980—2015年6期土地利用的时空动态变化和景观格局特征, 采用InVEST模型综合评估了赤水河流域的水源供给、土壤保持、碳存储和生境质量等生态系统服务功能, 并分析了35年间流域生态系统服务功能的时空分异特征。研究结果表明: 赤水河流域1980—2015年土地利用未发生显著变化, 保持了相对天然的生态系统状况。流域产水量近年来略微增加, 中下游是主要的产水区。流域整体土壤侵蚀状况为微度侵蚀, 轻度侵蚀面积近年来略微增加。赤水河流域为碳源区, 流域碳储量呈降低趋势。流域生境质量指数平均值约为0.78, 生境质量整体呈改善趋势。研究可为赤水河流域的生态环境保护提供参考。

关键词: 生态系统服务功能; InVEST; 土地利用; 生境质量; 土壤保持
中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20190030

1 研究背景

生态系统服务功能评估是对生态系统所提供和维持功能的定量表达[1]。随着气候变化和人类活动对生态系统影响加剧, 生态系统服务功能评估得到快速发展, 先后出现了流域、湿地、湖泊、城市等不同生态系统的服务功能评估方法研究[2-3], 不同学者针对性的开发了一些面向不同生态系统服务功能的评估模型, 例如InVEST、SoLVES、ARIES等模型[4]。其中, InVEST模型是使用最为广泛的模型之一, 一定程度上解决了生态系统服务功能形成机制不明确, 评估结果实用性差的问题, 能够较为直观的展示生态系统服务功能[5]。该模型称作生态系统服务和交易的综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST), 是由自然资本项目(Natural Capital Project)所提供的软件工具。国内外InVEST模型的应用已取得较多成果, 如三江源、西苕溪流域、美国加利福尼亚等[6-11], 总体来看, InVEST模型具有广泛的适用性, 模型的子模块较多, 国内外应用较多的是水源供给、土壤保持、碳存储及生境质量模块; 在不同区域应用时, 需要对不同模块的参数进行相应调整, 如何确定适宜参数是模型应用时的主要研究内容之一[12]。

当前我国正处河流快速开发的进程, 高强度的河流开发活动给流域生态系统保护带来了新的挑战, 如何评估河流开发的生态影响与效益是研究难点[13-14]。本研究综合运用地理信息系统技术, 基于赤水河流域1980—2015年6期土地利用数据, 采用ArcGIS分析了流域土地利用动态度及时空分布特征, 采用Fragstats软件分析了流域景观结构特征、景观格局指数及其演化规律, 采用InVEST模型评估了流域的水源供给、土壤保持、碳储量和生境质量等生态系统服务功能, 并综合评估了流域生态系统服务功能整体状况。研究提出了赤水河流域生态环境保护的工作建议, 对完善生态系统服务功能评估方法和赤水河流域生态环境保护具有参考作用。

收稿日期: 2019-03-17; 网络首发时间: 2020-07-30
网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20200729.1243.003.html
基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0102400)
作者简介: 贾婉琳(1992-), 硕士生, 主要从事流域环境影响评价研究。E-mail: 625449359@qq.com
通讯作者: 陈昂(1989-), 工学博士, 高级工程师, 主要从事生态系统服务功能评估、生态流量研究。E-mail: angteenchen@gmail.com

2　数据与方法

2.1　研究区概况　赤水河是长江右岸的一级支流，干流全长436.5 km，流域面积20 440 km^2。流域地理位置独特，主要涉及云南镇雄、威信，贵州毕节、大方、金沙、仁怀、遵义、桐梓、习水、赤水，以及四川的叙永、古蔺、合江等13个县(市)(图1)。

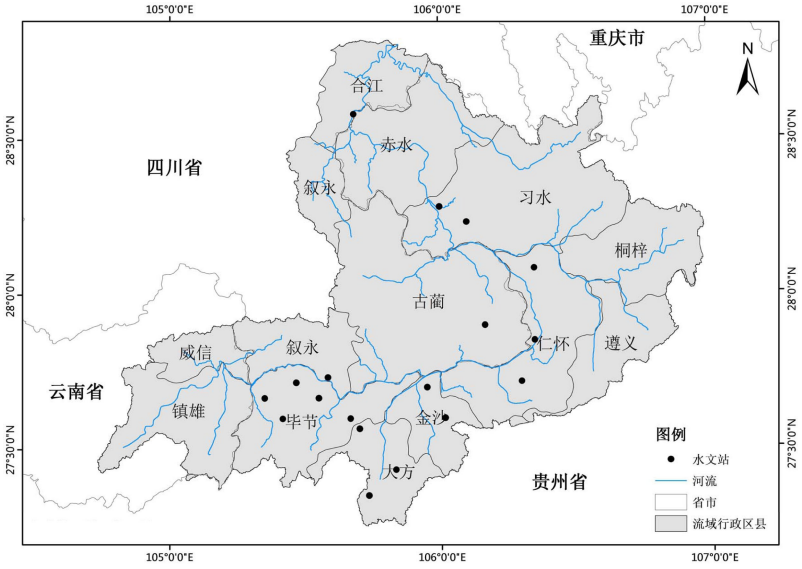


图1　赤水河流域地理位置示意图

2.2　研究方法　基于赤水河流域1980—2015年6期1∶10万土地利用数据，计算了6期土地利用的单一土地利用动态度和综合动态度；采用Fragstats 4.2软件计算了流域景观和土地利用类型尺度的8个景观格局指数(表1)。然后，采用InVEST模型的水源供给模块(Water yield)、土壤保持模块(Sediment Retention)、碳储量模块(Carbon)和生境质量模块(Habitat Quality)评估了流域生态系统服务功能，模块运行结果分别得到流域产水量、潜在土壤侵蚀量、碳储量和生境质量指数、生境退化指数，通过在ArcGIS中叠加不同土地利用类型图和行政区划图，进一步分析了不同土地利用类型和不同县(市)的生态系统服务功能，并以专题地图形式展示。

2.3　数据准备与处理　分析的数据基础是数字高程模型(DEM，Digital Elevation Model)、土地利用数据和流域拓扑关系。DEM数据来源于地理空间数据云网站提供的90m分辨率的SRTM V4.1数据；基于DEM数据，利用ArcGIS软件的水文分析(Hydrology)功能，提取了赤水河流域的边界和水系河网。土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心，选取1980年、1990年、2000年、2005年、2010年、2015年6期数据，经接边、转换、裁剪等处理得到赤水河流域30 m分辨率的栅格数据。InVEST模型需要大量数据和参数作为输入变量，4个模块的基本输入数据大致相同，针对不同模块特点，部分数据有所差异，模型总体数据需求及来源见表2。其中，降雨量数据根据水文年鉴查询到赤水河流域18个水文站点的日降雨资料，根据降雨资料统计结果利用ArcGIS软件的克里格插值(Kriging)，生成相应年份的流域面状降雨量数据。

确定InVEST模型不同模块的适宜参数是研究的难点，本研究主要通过查阅研究区附近区域相关文献，结合InVEST模型用户指南(http：//data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/InVEST-users-guide/html/)确定主要的参数值[15]，见表3。降雨侵蚀性因子R可根据赤水河流域不同年份降水量图层，利用ArcGIS中Raster Calculator工具计算得到，根据文献研究成果，α_1取0.0668，β_1取1.6266。

确定不同土地利用类型碳密度时，综合考虑气温和降水因子修正碳密度值。由于年均气温与土壤碳密度的关系尚未有详细文献记载，且气温与土壤碳密度的相关性明显低于降水，因此本研究只考虑降水量对土壤碳密度的影响，采用全国碳密度数值与碳密度修正系数的乘积作为赤水河流域碳

表1　赤水河流域土地利用和景观格局指标

类别	指标	中文全称	解释	指标意义
动态度	LDD	单一土地利用动态度	$LDD=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\%$	反映该土地利用类型在转移时段的活跃程度。
	TLDD	综合动态度	$TLDD=\frac{I(D)}{S}\times100\%$	反映的是在一定时间段范围内，研究区各景观类型转移的总体活跃程度。
景观破碎化指数	NP	斑块数量	指某一景观类型中所有斑块的数量	值越大，说明景观格局的破碎化程度越高
	PD	斑块密度	指单位面积上某种景观类型斑块数量	可以反映斑块的密集程度
	LPI	最大斑块指数	某一类型的最大斑块占总面积的比例	反映了斑块的集中程度和景观的优势类型
	AREA_MN	平均斑块面积	斑块类型面积除以斑块总数	反映了景观破碎化程度
	DIVISION	景观分离指数	反映景观分离程度	值越大，景观分离程度越大，破碎化程度越高
景观形状指数	FRAC_AM	面积加权分维数	反映了景观和斑块形状与面积大小之间的相互关系	描述了在一定观测尺度上景观类型形状的复杂程度。值越大，表示斑块形状越复杂
景观多样性指数	SHDI	香农多样性指数	反映了景观类型的多少和各景观类型所占比例的变化	值越大，说明景观类型越丰富，破碎化程度越高，所含不确定信息也就越多
	SHEI	香农均匀度指数	反映了景观中各组成斑块的分布均匀程度	值为0时，说明景观仅有一种组成，无多样性；值为1时，说明各斑块类型均匀分布，有最大多样性

表2　InVEST模型数据需求及来源

数据类型	数据描述	数据来源	适用模块
DEM	栅格数据，空间分辨率90 m	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/)SRTM V4.1	土壤保持
土地利用	栅格数据，空间分辨率30 m 1980—2015年	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	水源供给 土壤保持 碳储量 生境质量
降水量	栅格数据，空间分辨率1000 m 1980—2015年	水文年鉴：赤水河流域18个水文站点的日降水资料	水源供给 土壤保持
土壤数据	栅格数据，空间分辨率1000 m 植物可利用含水率和土壤深度2个指标	寒区旱区科学数据中心：基于世界土壤数据库(HWSD V1.1)的中国土壤数据集(westdc.westgis.ac.cn/data/611f7d50-b419-4d14-b4dd-4a944b141175)	水源供给
年均潜在蒸散发	栅格数据	全球干旱和潜在蒸散数据 (http://www.cgiar-csi.org/data/lobal-aridity-and-pet-database)	水源供给

表3　InVEST模型不同模块的参数及确定依据

模块	参数类型	参数描述	参数来源
水源供给	季节性因子	经验常数，Z值取13。	InVEST用户指南
	最大根系深度	Excel数据	
	植物蒸散系数	Excel数据	
	LULC_veg	Excel数据	
土壤保持	土壤可蚀性因子K值	栅格数据	第一次全国水利普查土壤侵蚀普查结果
	植被覆盖和作物管理因子	Excel数据	InVEST用户指南
	水土保持措施因子	Excel数据	
	汇水面积阈值	经验常数，取500	文献[16]
	降雨侵蚀性因子R	根据降雨量数据计算得到	$R=\alpha_1 P^{\beta_1}$
生境质量	生境得分值	Excel数据	文献[17]
	半饱和参数	参数，默认0.5	InVEST用户指南

密度值[18]（表4）。

确定生境质量模块的威胁因子时，考虑赤水河流域实际情况，运用ArcGIS空间分析工具分别提取不同时期的耕地、水域和建设用地3类受人为活动影响较大的类型；根据文献研究成果[17]，建立威胁因子数据表（表5）。

表4　赤水河流域不同土地利用类型碳密度值

土地利用类型	碳密度/(kg/m²)		
	地上生物量	地下生物量	土壤生物量
林地	4.24	11.59	23.69
耕地	0.57	8.07	10.84
草地	3.53	8.65	9.99
水域	0	0	0
建设用地	1.2	0	7.1
未利用土地	0	0	0

表5　生境质量模块威胁因子量表

威胁因子（THREATS）	最大影响距离（MAX_DIST）/km	权重（WEIGHT）	衰退线性相关性（DECAY）
耕地	8	0.7	线性相关
水域	5	0.6	指数型相关
建设用地	10	1	指数型相关

3　结果与讨论

3.1　土地利用与景观格局变化　赤水河流域1980—2015年土地利用类型35年间未发生显著变化，保持了相对天然的生态系统状况。2010—2015年，其他建设用地增速最快，LDD值达到532%，其次为农村居民点和城镇用地，LDD值分别为53%和15 %。1980—2015年的TLDD为0.36%，也表明流域土地利用变化并不活跃。

通过景观格局指数（图2）分析发现，1980—2015年研究区斑块数量（NP）和斑块密度（PD）增加，平均斑块面积（AREA MN）和最大斑块指数（LPI）下降，景观分离指数（DIVISION）值越接近于1，说明景观格局处于破碎化状态；面积加权分维数（FRAC AM）是反映景观形状复杂度的一个重要指标，数值略微有所下降，说明景观形状复杂度有减小的趋势；香农多样性指数（SHDI）增加；香农均匀度指数（SHEI）下降，表明1980—2015年研究区内景观多样性先趋于减少后增加，破碎化程度增大，景观均匀化程度减小。

3.2　水源供给功能评估　根据模拟结果（图3），赤水河流域平均产水深度约为400 mm，2015年平均产水量约为880×10^7 m³，据《贵州省2015年水资源公报》，2015年赤水河径流深度为504.4 mm，模拟

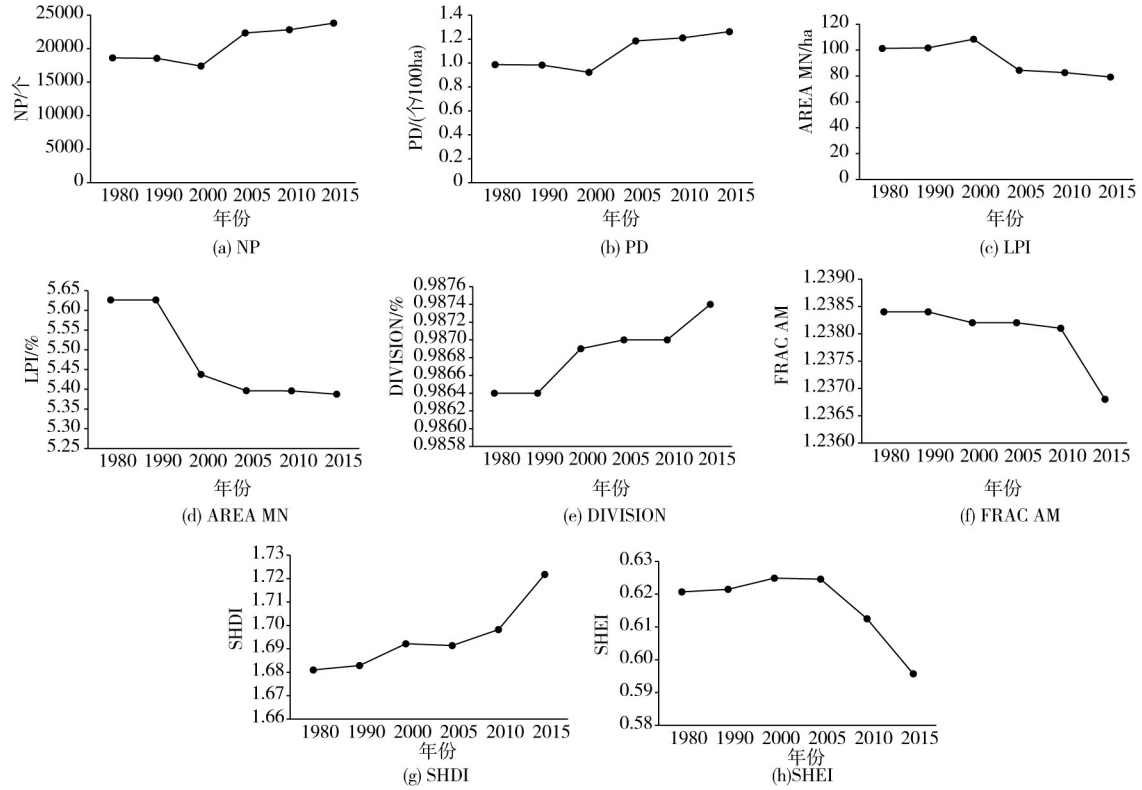


图2　赤水河流域1980—2015年景观格局指数变化

精度为82.47%，InVEST模型模拟结果是可行的。1980—2015年流域年平均产水量呈现逐年增加的趋势。2015年的产水量比1980年增加了0.81亿m^3，增幅为0.93%。

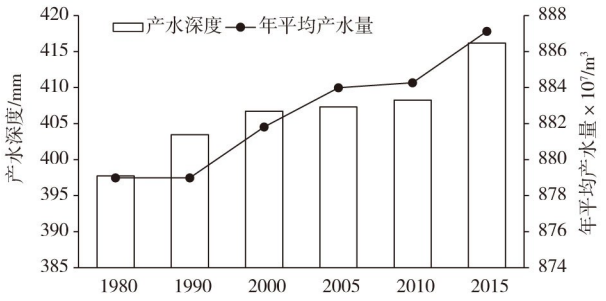


图3　赤水河流域1980—2015年产水量变化

总体来看，流域中下游产水量较高，1980—2015年流域产水量整体增加，左岸支流产水量有所下降，耕地、林地和草地的产水量都有不同程度的减少，由于建设用地面积增加且建设用地的蒸散量较低，故建设用地的产水量增加。1980—2015年耕地产水量减少量最大为0.529亿m^3，其中，产水量减少量最大为1990—2000年的林地，减少量为0.252亿m^3。

3.3　土壤保持功能评估　根据土壤保持模型计算结果，赤水河流域潜在土壤侵蚀总量为2067.4万t，1980—2015年实际土壤侵蚀总量变化不大，约为170多万t。根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)划分土壤侵蚀强度发现，流域侵蚀强度以微度侵蚀为主，微度侵蚀面积约占流域总面积的97%；1980—2015年赤水河流域的微度侵蚀面积占比略微减少为0.13%，轻度侵蚀面积占比略微增加为0.12%，中度侵蚀和强烈侵蚀面积未发现明显变化。

进一步分析评估了不同土地利用类型和不同县(市)的土壤保持功能，结果表明：裸岩石质地的土壤侵蚀模数最高，属于中度侵蚀；其次为中覆盖度草地和低覆盖度草地，属于轻度侵蚀；其他土地利用类型的土壤侵蚀模数均小于5 t/(hm^2·a)，属于微度侵蚀。根据赤水河流域1980—2015年不同县(市)的平均土壤侵蚀模数(图4)可知，流域上游毕节、威信、叙永3个县(市)的土壤侵蚀模数较高。

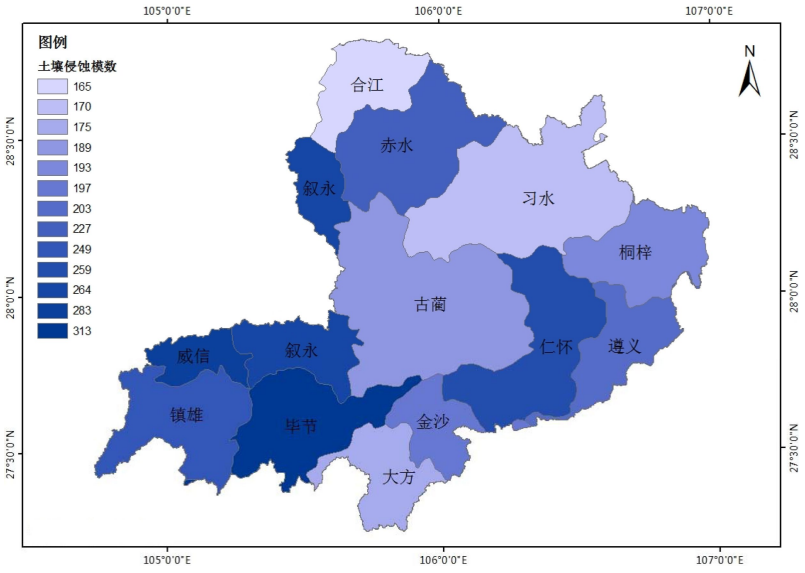


图4　赤水河流域1980—2015年不同县(市)的平均土壤侵蚀模数

3.4　碳储量功能评估　根据碳储量计算结果(图5)，赤水河流域碳储量约为58×10^6t，1980—2015年碳储量变化不大。根据对于全球大气中CO_2含量变化的贡献，可以把碳库分为碳源和碳汇两种类型，总体看来，1980—2015年赤水河流域碳收支基本平衡，为碳源区，累积损失碳量为151×10^3t。

根据赤水河流域1980—2015年不同阶段的总固碳量可知，2000—2010年流域为碳汇区，累积固碳量232×10^3t；1980—2000年和2010—2015年流域为碳源区，累积损失碳量383×10^3t。

3.5　生境质量功能评估　生境质量指数反映了区域生境斑块的破碎化状况和不同斑块对生境退化抗干扰能力的强弱[19]。赤水河流域1980—2015年生境质量指数变化不大，平均生境质量指数约为0.782；其中，2015年生境质量指数最低，为0.78。

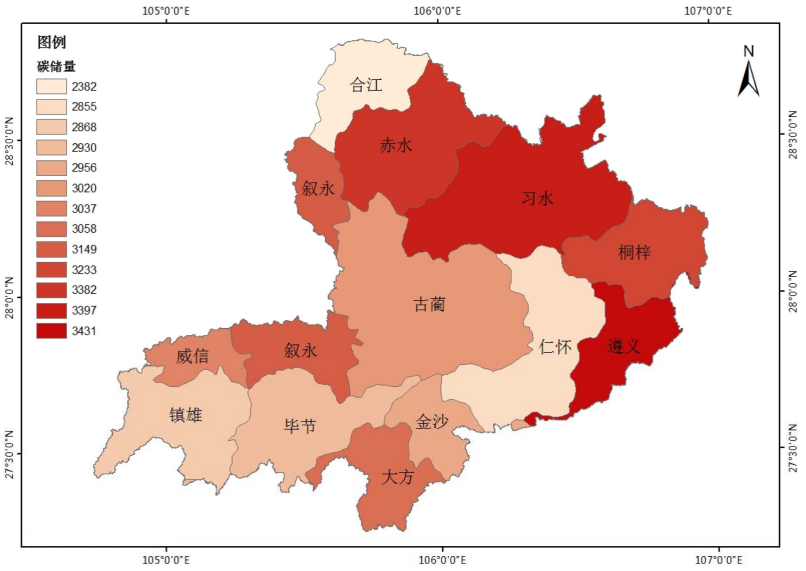


图5　赤水河流域1980—2015年碳储量空间分布

生境退化指数反映了威胁因子对区域生境潜在威胁状况及生境质量下降的概率大小。本研究采用ArcGIS软件空间分析模块中的重分类(Reclassify)工具和Natural Breaks(Jenks)方法对研究区6期的生境退化评估结果进行重分类，将生境退化指数分为轻度退化、中度退化和高度退化3个等级[8]，并统计不同等级退化程度的面积，结果发现：赤水河流域生境退化情况以中度退化为主，中度退化面积约占流

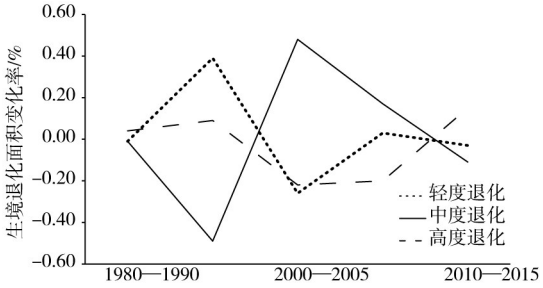
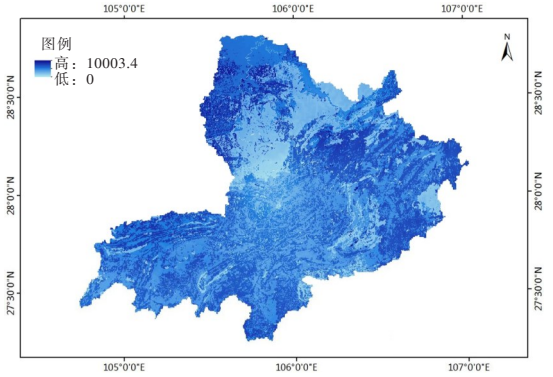
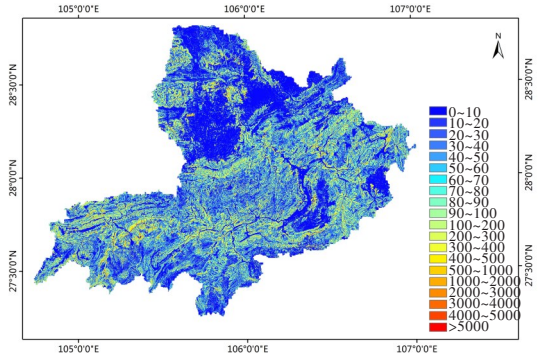


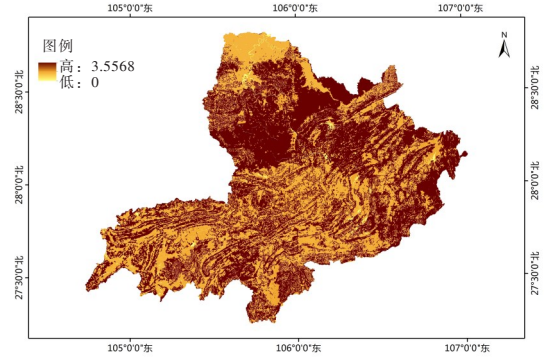
图6　赤水河流域1980—2015年平均生境退化程度变化率



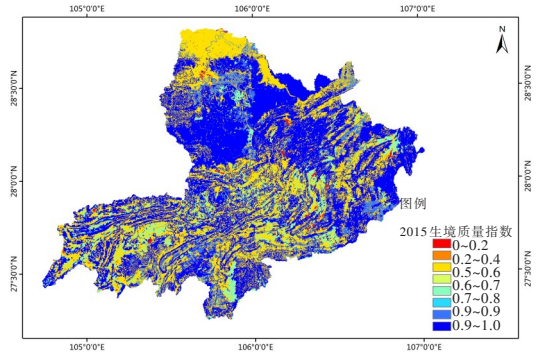
(a) 水源供给



(b) 土壤保持



(c) 碳储量



(d) 生境质量

图7　赤水河流域2015年生态系统服务功能评估结果

域总面积的56%。从不同生境退化程度面积变化率来看，不论是增加还是减小，1990—2000年的生境退化面积变化率最大，2000—2005年中度退化程度面积变化率增加，轻度和重度退化程度面积变化率减小(图6)。

3.6 综合分析与评估 通过对赤水河流域1980—2015年的生态系统服务功能评估，得到不同功能的空间分布(图7)。由于赤水河流域1980—2015年土地利用的变化，特别是由蒸散量较高的耕地转化为蒸散量较低的建设用地，流域产水量增加。从1980年到2015年，赤水河流域的微度侵蚀面积略微减少，中度侵蚀面积和强烈侵蚀面积基本保持不变。引起土壤侵蚀量增加的原因主要有：(1)裸岩石质地、低覆盖度草地有所增加，造成了一定程度的土壤侵蚀；(2)自1990年代起，实施的水土保持重点治理工程，以及退耕还林、石漠化综合治理等生态建设项目，流域水土流失恶化趋势得到了有效遏制，减缓了土壤侵蚀程度的加剧。从1980到2015年，流域碳储量减少，受到耕地、水域和建设用地威胁因子的影响，赤水河流域的生境质量略有下降，流域的生境退化程度基本保持稳定，变化较大的区域大部分集中在赤水河的中上游。

4 结论

赤水河流域是复杂的生态系统脆弱区，流域1980—2015年TLDD为0.36%，土地利用变化并不活跃，保持了相对天然的生态系统状况。InVEST模型对流域自然资本的评估和管理有着显著的优越性，但模型本身也存在一定的局限性，只能在一定程度上诠释其分布特征和生态情况，不能完全反映流域生态系统服务功能的真实情景。

采用InVEST模型定量评估了赤水河流域生态系统服务功能，主要结论为：1980—2015年流域产水量和土壤轻度侵蚀量均略微增加，增幅分别为0.93%和0.12%，土壤保持量及土地利用类型均会影响区域土壤保持功能价值量的大小。流域为碳源区，碳储量呈下降趋势，林地固碳能力最强，且碳储量最大，通过改变土地利用类型退耕还林防止土壤侵蚀，增加流域固碳量的有效措施之一。受威胁因子影响，1980—2015年生境质量略有下降，2015年生境质量为7.8，低于35年来平均水平7.82，生境退化程度较低，表明生境质量下降潜在可能性较小，赤水河流域生境质量趋向良性，继续加强林地保护有利于流域生态恢复。鉴于InVEST模型评估结果存在的不确定性，建议未来研究中可引入定量评估的方法对输入数据进行分析，以提高评估结果的准确性。

参 考 文 献：

[1] TURNER R K, DAILY G C. The ecosystem services framework and natural capital conservation[J]. Environmental and Resource Economics, 2008, 39(1): 25-35.

[2] BRAUMAN K A, DAILY G C, DUARTE T K E, et al. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2007, 32(1): 67-98.

[3] PERRINGS C, NAEEM S, AHRESTANI F, et al. Conservation, ecosystem services for 2020[J]. Science (New York), 2010, 330(6002): 323-324.

[4] VIGERSTOL K L, AUKEMA J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(10): 2403-2409.

[5] 吴哲，陈歆，刘贝贝，等. InVEST模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学，2013，33(4)：58-62.

[6] 杨芝歌，周彬，余新晓，等. 北京山区生物多样性分析与碳储量评估[J]. 水土保持通报，2012，32(3)：42-46.

[7] 杨园园，戴尔阜，付华. 基于InVEST模型的生态系统服务功能价值评估研究框架[J]. 首都师范大学学报(自然科学版)，2016，33(3)：41-47.

[8] 王宏杰. 基于InVEST的三江源生境质量评价[J]. 价值工程，2016(23)：66-70.

[9] JAGER H I, SMITH B T. Sustainable reservoir operation: can we generate hydropower and preserve ecosystem

values?[J]. River Research and Applications, 2008, 24(3): 340-352.
[10] 徐建宁. 基于InVEST模型的小江流域生态系统服务评估[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
[11] HARDIE S A, BOBBI C J. Compounding effects of agricultural land use and water use in free-flowing rivers: confounding issues for environmental flows[J]. Environmental Management, 2018, 61(3): 421-431.
[12] 侯红艳, 戴尔阜, 张明庆. InVEST模型应用研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2018(4): 62-67.
[13] FU B, WANG Y K, XU P, et al. Value of ecosystem hydropower service and its impact on the payment for ecosystem services[J]. Science of The Total Environment, 2014, 472: 338-346.
[14] 陈昂, 沈忱, 吴淼, 等. 中国河道内生态需水管理政策建议[J]. 科技导报, 2016(22): 11.
[15] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST 3.5.0 User's Guide[Z]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, 2018.
[16] WU M, SHI P, CHEN A, et al. Impacts of DEM resolution and area threshold value uncertainty on the drainage network derived using SWAT[J]. Water SA, 2017, 43(3): 450-462.
[17] 任涵, 张静静, 朱文博, 等. 太行山淇河流域土地利用变化对生境的影响[J]. 地理科学进展, 2018(12): 1693-1704.
[18] 黄卉. 基于InVEST模型的土地利用变化与碳储量研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
[19] TERRADO M, SABATER S, CHAPLIN K B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of The Total Environment, 2016, 540: 63-70.

Research on evaluation of ecosystem services in chishui river basin based on InVEST

JIA Wanlin[1], WU Sainan[1], CHEN Ang[1, 2]

(1. *Research Center for Sustainable Hydropower Development, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan* 430062, *China*)

Abstract: By assessing watershed ecosystem services (ESs) and analyzing the spatio-temporal dynamic evolution of ESs, the overall health level and degradation of ecosystem can be quickly identified, so as to make decisions for watershed ecosystem protection. In this paper, spatio-temporal changes of land use from 1980 to 2015 and landscape patterns in the Chishui River Basin were analyzed using ArcGIS and Fragstats. InVEST was adopted to comprehensively evaluate the ESs of water yield, soil retention, carbon storage and habitat quality, and to analyze the spatio-temporal distribution of ESs during the past 35 years. The results demonstrate that the land use changes in the Chishui River Basin are not significant, and the relatively natural ecosystem condition is maintained. Moreover, the water yield in the basin has slightly increased in recent years, and the middle and the lower catchment are the main areas of water production. The general soil erosion status in the basin is slight, and the areas of light erosion has increased in recent years. The Chishui River Basin is a carbon source area, but the carbon storage in the basin is decreasing. Nevertheless, the average habitat quality index of the basin is about 0.78, and the habitat quality has improved. This study can provide reference for the ecological environment protection of Chishui River basin.

Keywords: ecosystem services; InVEST; land use; habitat quality; soil retention

(责任编辑: 祁 伟)