引文格式：王飞,董廷旭,张雪茂. 2000—2018年龙门山生态系统服务价值对土地利用程度的响应[J]. 地理空间信息, 2024, 22(7): 108-113. doi: 10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.07.025

2000—2018年龙门山生态系统服务价值对土地利用程度的响应

王　飞[1,2]，董廷旭[1,2*]，张雪茂[3]
（1. 绵阳师范学院 资源环境工程学院，四川 绵阳 621006；2. 生态安全与保护四川省重点实验室，四川 绵阳 621006；
3. 湖南师范大学 地理科学学院，湖南 长沙 410081）

摘　要：为揭示土地利用程度对龙门山生态系统服务价值（ESV）的影响，利用GIS空间分析技术定量分析了2000—2018年ESV和土地利用程度的时空演变规律，并利用空间自相关模型探讨了二者的相关性。结果表明，18年间研究区土地利用程度逐渐提高，增长率为0.36%，ESV总量约减少1.2亿元，各地类的ESV敏感性指数均小于1，ESV核算结果可信；该区域ESV空间正向自相关性显著：ESV高—高值区域位于汶川、北川一带，ESV低—低值区域则集中于邛崃、崇州和都江堰等地；该区域土地利用程度对ESV均为明显的负效应，即土地利用程度越高，ESV越低，土地利用方式和程度对ESV具有重要影响。

关键词：土地利用程度；ESV；敏感性分析；空间自相关；龙门山地区
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）07-0108-06

Response of Ecosystem Service Value to Land-use in Extent Longmenshan Area from 2000 to 2018

WANG Fei[1,2], DONG Tingxu[1,2], ZHANG Xuemao[3]
(1. School of Resources and Environmental Engineering, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621006, China;
2. Key Laboratory of Ecological Security and Protection of Sichuan Province, Mianyang 621006, China;
3. School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: In order to explore the impact of land-use on ecosystem service value (ESV) in the Longmenshan area, we used spatial autocorrelation analysis model in conjunction with GIS spatial analysis technology to quantitatively investigate the spatio-temporal evolution of ESV and land-use extent in the study area from 2000 to 2018. The results show that the land-use extent in the study area has been gradually increased in the past 18 years, with a growth rate of 0.36%, and the total ESV has decreased by about 120 million yuan. The ESV sensitivity indexes of each land cover type are less than 1, indicting the results of ESV are reliable. This region showed a positive autocorrelation of ESV space from 2000 to 2018. The ESV high-high value areas are situated in Wenchuan and Beichuan, whereas the ESV low-low value areas are concentrated in Qionglai, Chongzhou and Dujiangyan. The ESV value is significantly influenced by the mode and extent of land-use in this area.

Key words: land-use extent, ESV, sensibility analysis, spatial autocorrelation, Longmenshan area

基于土地利用/覆被变化（LUCC）的生态系统服务价值（ESV）研究可为土地资源可持续发展利用提供重要依据[1]。生态系统服务功能包含供给、调节、支持、文化4类[2-3]，自1997年Costanza R[4]等评估全球ESV以来，土地ESV的研究得到众多学者关注，包括优化Costanza模型并构建中国ESV基础当量表[5]、基于LUCC分析地类变化对区域ESV的影响[6]、通过灰色关联度分析影响ESV变化的主要原因[7]、ESV与建设用地之间的关系[8]等。土地利用变化与ESV的关系密切，但ESV空间分布特征及其与土地利用程度间关系的定量化、精细化研究有待深入。龙门山地区为长江上游生态安全重要屏障，对于四川省生态系统服务功能提升以及区域可持续发展具有关键作用[9-10]。相关研究[11-12]分析了龙门山地区ESV的时空特征，但未探讨土地利用程度与ESV之间的关系。因此，本文构建了龙门山地区土地利用程度综合指数和ESV核算模型，

收稿日期：2022-11-20。
项目来源：四川省科技厅科技计划资助项目（2019YJ0496）；生态安全与保护四川省重点实验室开发基金资助项目（ESP1707）；绵阳师范学院研究生创新实践基金资助项目（CX202202）。
第一作者简介：王飞（1996—），硕士研究生，研究方向为生态环境监测与治理，E-mail：3248747548@qq.com。
通信作者：董廷旭（1965—），本科，教授，研究方向为土地利用与区域生态安全、3S技术集成应用，E-mail：852798223@qq.com。

并借助GIS和GeoDa等软件基于该区土地利用程度和ESV的时空变化特征重点探讨了ESV对土地利用程度的响应，旨在为该区生态环境保护提供一定参考。

1　研究区概况

四川省龙门山地区是岷江、嘉陵江和汉江的发源地，位于青藏高原和四川盆地的交界处，地势西高东低，受亚热带季风气候影响，降水丰富且集中于夏季，跨雅安、成都、德阳、绵阳、广元等7市24县，绵延500多km。

2　研究方法

2.1　数据来源

2000—2018年土地利用遥感影像数据的空间分辨率为1 km，下载于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn），按该系列数据一级地类分类标准将研究区划分为耕地、林地、水域、建设用地、草地和未利用地6类；行政边界数据下载于地理国情监测云平台（http://www.dsac.cn/）；粮食价格、产量、作物播种面积等数据来源于《中国能源统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》以及四川省（市、县、区）统计年鉴。

2.2　土地利用程度分析

刘纪远[13]、李辉[14]等在综合分析土地利用程度时将其划为4级，即未利用地级（未利用地和难利用地）的分级指数为1，林地、草地、水域用地级的分级指数为2，农业用地级（耕地）的分级指数为3，城镇聚落用地级（建设用地）的分级指数为4。土地利用程度综合指数的计算公式为：

$$W=\sum_{i=1}^{n}A\times B \tag{1}$$

$$B=C/T \tag{2}$$

式中，W、A、B、n分别为土地利用程度综合指数、地类分级指数、土地面积占比、土地利用程度分级数（$n=4$）；C为第i级地类面积；T为地类总面积。

2.3　ESV核算

借鉴前人研究[15-16]设置龙门山地区的当量因子，利用代表区域性差异的生物量因子对基础当量进行修正[11-12,17]，生态系统的经济价值量自然状态下为当前单位面积耕地所产生食物生产服务价值的1/7[18]。根据式（3）计算得到该区1个ESV当量因子的经济价值量为2 085.44 元/hm^2，并建立研究区单位面积生态系统服务价值系数（表1）。

$$S_a=\frac{1}{7}\sum_{k=1}^{n}\frac{m_k p_k q_k}{A} \tag{3}$$

式中，S_a为单位面积农田生态系统产生的生产服务价值（元/hm^2）；k为农作物类型；n为粮食种类；m_k为粮食作物k的种植面积（hm^2）；p_k为粮食作物k的全国平均单价（元/kg）；q_k为粮食作物k的单产（kg/hm^2）；A为粮食总面积（hm^2）。

表1　龙门山地区ESV系数/元·hm^{-2}·a^{-1}

生态系统服务		属性	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	当量因子	1.35	0.10	0.30	0.10	0.10	0.01
		价值系数	2 815.34	208.54	625.63	208.54	208.54	20.85
	原材料生产	当量因子	0.14	2.60	0.05	0.01	0	0
		价值系数	291.96	5 422.14	104.27	20.85	0	0
调节服务	气体调节	当量因子	0.68	3.50	0.80	0	0	0
		价值系数	1 418.1	7 299.04	1 668.35	0	0	0
	气候调节	当量因子	1.20	2.70	0.90	0.46	0	0
		价值系数	2 502.53	5 630.69	1 876.90	959.30	0	0
	水源涵养	当量因子	0.81	3.20	0.80	20.38	−7.51	0.03
		价值系数	1 689.21	6 673.41	1 668.35	42 501.27	−15 661.7	62.56
	废物处理	当量因子	2.21	1.31	1.31	18.18	−2.46	0.01
		价值系数	4 608.82	2 731.93	2 731.93	37 913.30	5 130.18	20.85
支持服务	土壤形成与保护	当量因子	1.97	3.90	1.95	0.01	0.02	0.02
		价值系数	4 108.32	8 133.22	4 066.61	20.85	41.71	41.71
	维持生物多样性	当量因子	0.96	3.26	1.09	2.49	0.34	0.34
		价值系数	2 002.02	6 798.53	2 273.13	5 192.75	709.05	709.05
文化服务	美学景观	当量因子	0.01	1.28	0.04	4.34	0.01	0.01
		价值系数	20.85	2 669.36	83.42	9 050.81	20.85	20.85
合计			19 457.15	45 566.86	15 098.59	95 867.67	−9 511.32	875.87

$$\mathrm{ESV}=\sum_{r=1}^{6}A_r\times VC \tag{4}$$

式中，r 为地类；A_r 为地类面积（hm^2）；VC 为ESV系数（元/hm^2）。

2.4 ESV敏感性分析

敏感性指数（CS）可判断地类的ESV在时间影响下对价值系数的依赖性，进而说明ESV对VC的敏感程度，即ESV核算结果的准确性[19]。若CS大于1，则ESV核算结果不可靠；反之，则结果可靠[20]。

$$CS=\left|\frac{\left(\mathrm{ESV}_j-\mathrm{ESV}_i\right)/\mathrm{ESV}_i}{\left(VC_{jr}-VC_{ir}\right)/VC_{ir}}\right| \tag{5}$$

式中，i、j分别为VC调整50%前、后的ESV。

2.5 空间自相关分析

空间自相关分析包括全局和局部空间自相关分析。全局莫兰指数（Moran's I）可衡量全局空间自相关时各空间要素的分布状态，表达总体相关性趋势；局部Moran's I_i指数则反映局部区域相关要素间的空间相关性[21-22]。

$$\text{Moran's I}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq 1}^{n}\boldsymbol{u}_{ij}\left(v_i-\bar{v}\right)\left(\boldsymbol{u}_{ij}-\bar{v}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{u}_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}\left(v_i-\bar{v}\right)^2} \tag{6}$$

$$\text{Moran's I}_i=\frac{\left(v_i-\bar{v}\right)}{t_0}\sum_j\boldsymbol{u}_{ij}\left(v_i-\bar{v}\right) \tag{7}$$

$$t_0=\sum_i\left(v_i-\bar{v}\right)^2/n \tag{8}$$

式中，n为总空间单元数（n=12 873）；v_i、v_j为v在第i、j空间单元上的观测要素；$\bar{v}$为v的平均值；$\boldsymbol{u}_{ij}$为v_i、v_j的空间权重矩阵，观测要素相邻时$\boldsymbol{u}_{ij}=1$，不相邻时$\boldsymbol{u}_{ij}=0$。-1<Moran's I<1，Moran's I<0则观测要素间为负相关；Moran's I=0为互不相关；Moran's I>0为正相关；值越大，空间关系越紧密。Moran's I_i<0则空间单元高—低或低—高值聚集；Moran's I_i>0则高—高值或低—低值聚集。

Moran's I_i通过式（9）进行显著性检验。

$$Z\left(I_i\right)=\frac{I_i-E\left(I_i\right)}{\sqrt{\mathrm{VAR}\left(I_i\right)}} \tag{9}$$

式中，$Z(I_i)$为显著性水平；$E(I_i)$、$\mathrm{VAR}(I_i)$为Moran's I_i的期望和方差。

3 研究结果与分析

3.1 土地利用程度分析

本文利用ArcGIS基于2 km×2 km格网提取土地利用面积（图1），计算土地利用程度综合指数，并根据自然段点法将其划分为低（1.240~1.877）、较低（1.877~2.161）、中（2.161~2.454）、较高（2.454~2.849）、高（2.849~3.819）5个等级（图2）。2000—2018年研究区45%以上的面积为林地，其次是草地和耕地，其余4种地类面积较少；2000—2018年土地利用程度的整体增长率为0.36%；土地利用程度低值区位于泸定、宝兴、汶川、茂县、北川、平武等地；高值区集中于安州、什邡、都江堰、崇州、邛崃等地。

3.2 ESV时空变化分析

3.2.1 ESV时序变化

本文利用ArcGIS基于2 km×2 km格网计算得到研究区ESV（表2、图3），可以看出，2000—2018年ESV总量由1 518.34亿元波动减少至1 517.14亿元；林地、耕地和草地提供的ESV占比达97%以上，构成ESV主体，其中林地提供的ESV最多，年均占比高达68.51%，建设用地提供的最少；2000—2005年ESV总量降幅最大为-0.24%，2015—2018年ESV总量随林地、水域和未利用地ESV的增加而增加1.41亿元；该区提供的土壤形成与保护服务功能最多，其次为维持生物多样性功能；整体上调节服务占优势地位，共提供50.81%的ESV，而文化服务的ESV占比最小，为4.39%。

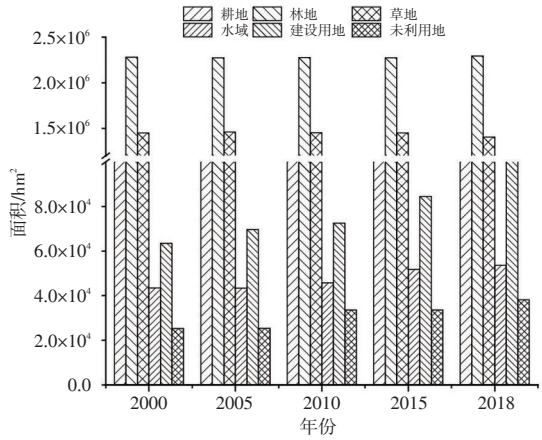


图1 2000—2018年龙门山地区土地利用结构统计

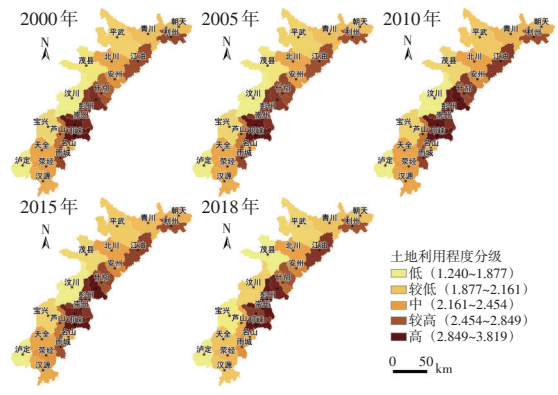


图2 2000—2018年土地利用程度空间分布

审图号：图川审（2017）16号

表2　2000—2018年各地类ESV结构与变化

地类	价值划分	ESV					变化量/亿元	变化率/%
		2000年	2005年	2010年	2015年	2018年		
耕地	价值量/亿元	224.66	222.60	221.29	218.57	218.09	−6.56	−2.92
	比例/%	14.80	14.70	14.61	14.42	14.38		
林地	价值量/亿元	1 038.78	1 036.41	1 037.22	1 036.36	1 045.34	6.56	0.63
	比例/%	68.42	68.42	68.46	68.37	68.90		
草地	价值量/亿元	219.21	220.67	219.39	219.07	212.10	−7.10	−3.24
	比例/%	14.44	14.57	14.48	14.45	13.98		
水域	价值量/亿元	41.71	41.61	43.91	49.67	51.38	9.68	23.20
	比例/%	2.75	2.75	2.90	3.28	3.39		
建设用地	价值量/亿元	−6.03	−6.62	−6.89	−8.03	−10.11	−4.08	67.60
	比例/%	−0.40	−0.44	−0.45	−0.53	−0.67		
未利用地	价值量/亿元	0.23	0.23	0.30	0.30	0.33	0.11	48.31
	比例/%	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02		
总计	价值量/亿元	1 518.34	1 514.69	1 515.14	1 515.73	1 517.14	−1.40	−0.09

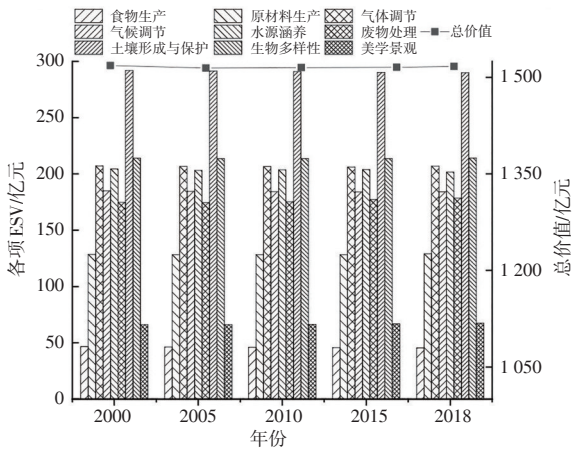


图3　2000—2018年单项ESV

3.2.2　ESV空间分异特征

根据自然断点法将2000—2018年总ESV划分为低（0.022~0.098亿元）、较低（0.098~0.137亿元）、中（0.137~0.182亿元）、较高（0.182~0.247亿元）和高（0.247~0.338亿元）5个级别（图4），可以看出，2000—2018年ESV整体以中值和低值区为主，低值区面积逐渐减少，其余等级区面积逐渐增加；空间上呈西高东低趋势，ESV高值区集中在西南部，每个格网的ESV均值高达0.325亿元，较高值区ESV均值在0.147~0.202亿元之间，主要位于平武、北川、汶川、彭州、荥经等地，中值区居于较高值区两侧，如北川—江油—安州—汶川—汉源—荥经等地，较低和低值区位于中值区两侧，如青川—利州—茂县等地；2010年和2018年汶川、彭州、都江堰和汉源地区的ESV中值区面积增加，说明生态系统服务功能得到一定程度的提高。

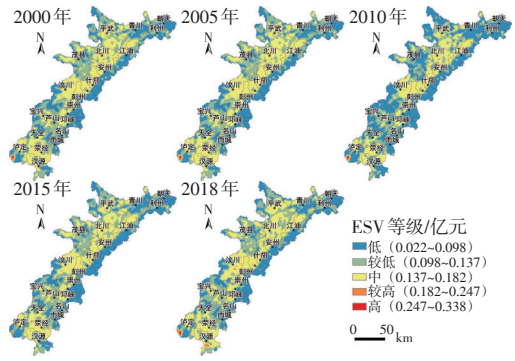


图4　2000—2018年ESV空间分布

审图号：图川审(2017)16号

3.2.3　ESV空间自相关分析

在GeoDa中对2000—2018年5个时期的ESV总量、ESV总量均值分别进行全局和局部空间自相关分析（图5），可以看出，Moran's I值依次为0.511、0.511、0.481、0.548、0.507，均大于0，变化率仅为−0.78%，表明空间上ESV整体呈正向空间自相关关系；局部Moran's I_i值为0.578，即ESV在空间上具有明显的正向空间自相关性；ESV分布呈一定的空间聚集特征，即ESV高值区和低值区趋于相邻分布，且空间集中分布特征较稳定；ESV低值区各网格单元间无明显区别，高值区和高、低值交错式分布区域存有较大差异。汶川、北川一带因植被覆盖率高、生态完整性好，为ESV值高—高聚集区；什邡、崇州、邛崃一带受人类活动干扰影响明显、土地利用程度高，为ESV值低—低聚集区，趋同性特征表现明显且稳定分布，面积占比达46.60%。因此，在土地开发利用与生态系统服务功能保育和维持过程中应重视区域协作，保护高生态系统服务供给潜力的地类，共同推进龙门

山地区的生态可持续发展。

3.3 ESV敏感性分析

由表3可知，2000—2018年各地类*CS*值均小于1，即ESV对其系数缺乏弹性，ESV结果可靠。林地*CS*值最高，*VC*值每上调1%，总ESV值将增加0.689 0%；水域面积远小于林地，其*CS*值小于林地；未利用地的*CS*值最低，仅为0.000 1；建设用地的*CS*值随其面积增加而增大；耕地、草地的*CS*值分别从2000年、2005年开始减小。

3.4 ESV对土地利用程度响应

为揭示龙门山地区ESV对土地利用程度的响应特征，首先将2000—2018年5个时期的ESV与土地利用程度综合指数进行Pearson相关性分析，相关性系数依次为−0.447、−0.452、−0.412、−0.489、−0.487（显著性水平为0.01），由于系数均小于0且呈增大趋势，因此该区域ESV与土地利用程度存在负相关关系，随时间变化该关系愈发明显；再将二者在GeoDa中进行双变量局部空间自相关分析（图6），局部Moran's I_i值为−0.351，即土地利用程度和ESV具有显著负向空间自相关性。土地利用程度高的地区ESV较低，二者高—低和低—高值区域聚集明显，面积占比为38.07%。其中，汶川、北川一带典型低—高聚集区多为山地丘陵地貌，高生态系统服务供给潜力的林地、草地等为其主要地类，ESV较高；邛崃、崇州、都江堰等高—低聚集区地势平坦，地灾易发程度低，集中了研究区主要的耕地、建设用地和大量人口，土地利用程度随城市化水平的提高而持续增强，ESV较低。因此，ESV与土地利用程度在时间和空间上均为负相关关系。

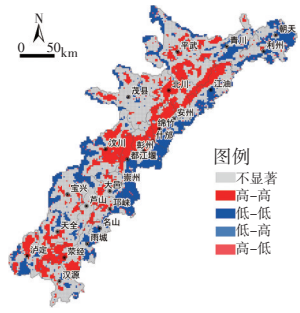


图5 ESV均值LISA聚类图

审图号：图川审(2017)16号

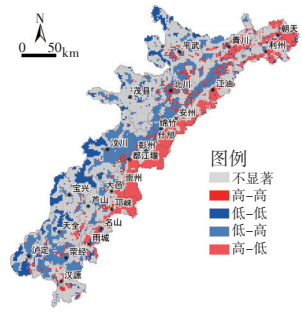


图6 ESV与土地利用程度综合指数双变量LISA聚类图

审图号：图川审(2017)16号

表3 不同地类的ESV敏感性指数

用地类型	ESV/亿元					*CS*值				
	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年
耕地*VC*+50%	1 630.77	1 626.09	1 625.78	1 625.12	1 626.19	0.147 8	0.147 1	0.146 0	0.144 3	0.143 8
耕地*VC*−50%	1 406.18	1 403.56	1 404.55	1 406.62	1 408.09					
林地*VC*+50%	2 037.79	2 032.95	2 033.71	2 033.98	2 039.81	0.683 9	0.684 3	0.684 5	0.683 8	0.689 0
林地*VC*−50%	999.11	996.64	996.57	997.71	994.47					
草地*VC*+50%	1 628.11	1 625.19	1 624.89	1 625.44	1 623.19	0.144 3	0.145 9	0.144 9	0.144 8	0.139 8
草地*VC*−50%	1 408.93	1 404.54	1 405.52	1 406.39	1 411.09					
水域*VC*+50%	1 539.39	1 535.69	1 537.18	1 540.76	1 542.83	0.027 5	0.027 7	0.029 1	0.033 0	0.033 9
水域*VC*−50%	1 497.68	1 494.08	1 493.27	1 491.10	1 491.45					
建设用地*VC*+50%	1 515.48	1 511.52	1 511.73	1 511.86	1 512.02	0.004 0	0.004 2	0.004 5	0.005 1	0.006 7
建设用地*VC*−50%	1 521.54	1 518.18	1 518.65	1 519.93	1 522.17					
未利用地*VC*+50%	1 518.65	1 515.00	1 515.37	1 516.08	1 517.31	0.000 1	0.000 4	0.000 3	0.000 5	0.000 2
未利用地*VC*−50%	1 518.43	1 514.77	1 515.08	1 515.78	1 516.97					

4 结 语

2000—2018年龙门山地区土地利用程度逐渐增强，增长率为0.36%，该区域东部土地利用程度整体高于西部地区。ESV总量减少1.2亿元，ESV总量的90%来自林地、耕地和草地；空间分异明显且正向自相关性显著，ESV高—高值区聚集于汶川、北川一带，低—低值区明显聚集于什邡、都江堰、崇州、邛崃等地。基于2 km×2 km格网，对5个时期的ESV和土地利用程度综合指数进行Pearson相关性和双变量局部空间自相关分析，ESV总量随土地利用程度的提高而降低，土地利用程度对ESV存在负效应。

目前关于龙门山地区土地利用程度对ESV影响的研究较少[12-13]，因此本文是探究该地区土地利用程度影响下ESV响应特征的有益尝试；但由于区域间的固有差异性会在一定程度上影响对生态系统服务与土地利用程度相互关系的判定，再加上ESV评估方法目前仍有待完善[19,22]，因此后续研究将继续优化龙门山地区ESV评估方法、分析土地利用变化对生态系统服务功能的影响机理，从而更好地促进该地区生态经济的

协调发展。

参考文献

[1] 戴尔阜,马良.土地变化模型方法综述[J].地理科学进展,2018,37(1):152-162

[2] 李辉,谭淼,姜文,等.三峡库区经济发展与生态环境的时空耦合特征[J].水土保持通报,2020,40(1):243-249

[3] Blattert C, Lemm R, Thees O, et al. Management of Ecosystem Services in Mountain Forests: Review of Indicators and Value of Functions for Model Based Multi-critera Decision Analysis[J]. Ecological Indicators,2017,79:391-409

[4] Costanza R, Arge A R, Groot R D, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. Nature: International Weekly Journal of Science, 1997, 387(6 630):3-15

[5] 谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13

[6] 张建,雷刚,漆良华,等.2003—2018年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J].生态学报,2021,41(4):1 280-1 290

[7] 李建蓉,乔庆华,桑会勇,等.土地利用与生态系统服务价值演变及其关联性[J].测绘科学,2021,46(12):179-185

[8] 李辉丹,叶长盛,华吉庆.南昌市土地利用变化对生态系统服务价值影响[J].水土保持研究,2020,27(3):277-285

[9] Fu B H, Shi P L, Guo H D, et al. Surface Deformation Related to the 2008 Wenchuan Earthquake, and Mountain Building of the Longmen Shan, Eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2011,40(4):805-824

[10] 刘小梅,吴晶,梁春涛,等.龙门山断裂带最新地震活动特征及其意义[J].地球物理学报,2019,62(4):1 312-1 322

[11] 胡利利,李亦秋,邓欧,等.龙门山地区1995–2015年生态系统服务价值变化[J].水土保持研究,2020,27(5):358-364

[12] 罗芳,潘安,陈忠升,等.龙门山断裂带土地利用变化及生态系统服务价值损益评估[J].西华师范大学学报(自然科学版),2021,42(4):417-425

[13] 刘纪远,庄大方,张增祥,等.中国土地利用时空数据平台建设及其支持下的相关研究[J].地球信息科学,2002,4(3):3-7

[14] 李辉,张晓媛,国洪磊.基于土地利用的三峡库区近30年生态系统服务价值时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(2):309-318

[15] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.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[J].自然资源学报,2015,30(8):1 243-1 254

[16] 李晓赛,朱永明,赵丽,等.基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J].中国生态农业学报,2015,23(3):373-381

[17] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196

[18] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, et al. Change in Ecosystem Service Values in the San Antonio Area, Texas[J]. Ecological Economics,2001,39(3):333-346

[19] 丁丽莲,王奇,陈欣,等.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[J].生态学报,2019,39(8):2 973-2 985

[20] Das M, Das A. Dynamics of Urbanization and Its Impact on Urban Ecosystem Services (UES): A Study of a Medium Size Town of West Bengal, Eastern India[J]. Journal of Urban Management,2019,8(3):420-434

[21] 段晨阳,王晓艳.山东省植被覆盖的时空变化分析[J].地理空间信息,2022,20(10):49-53

[22] 杨强强,徐光来,李爱娟,等.青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究[J].生态学报,2021,41(23):9 315-9 327

(上接第103页)

参考文献

[1] 何开全,彭文,陈贵花,等. 二三维海陆一体综合信息平台设计与实现[J]. 测绘地理信息,2022,47(1):47-50

[2] 马丹,阳凡林,崔晓东,等. 基于OpenGL的海底地形三维渲染方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(2):99-106

[3] 陈殿称,卜宪海,阳凡林,等. 海底地形数据组织与可视化选取技术[J]. 海洋通报,2022,41(2):140-146

[4] 王孟博,董泽,石轲,等. WebGL技术探索及几种基于WebGL的引擎比较[J]. 中国科技信息,2021(5):89-90

[5] 辛全波,秦柳,范俊甫,等. 基于WebGL的航道数据组织与三维可视化方法[J]. 测绘地理信息,2022,47(1):81-85

[6] 高菲,任鸿翔,闫霞. 基于Delaunay三角网的大规模航道地形构建及疏密控制[J]. 水运工程,2022(12):215-220

[7] 李瑞清,熊伟,吴烨,等. 一种基于MBTiles的地图瓦片存储技术[J]. 地理空间信息,2019,17(12):58-62

[8] 张玲,蔡忠亮,殷红,等. 航道冲淤分析的可视化增强方法研究[J]. 测绘通报,2014(11):68-72

[9] 孙晓鹏,张芳,应国伟,等. 基于Cesium.js和天地图的三维场景构建方法[J]. 地理空间信息,2018,16(1):65-67

[10] 袁占全,曾威,郑松,等. 航道整治工程BIM+GIS三维交互汇报系统设计与应用[J]. 水运工程,2022(11):184-190