

DOI: 10.5846/stxb201803210558

郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. 生态学报, 2019, 39(10): - .

Guo C Y, Gao S, Zhou B Y, Gao J H. Effects of land use change on ecosystem service value in Funiu Mountain based upon a grid square. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究

郭椿阳¹, 高尚², 周伯燕¹, 高建华^{1,*}

¹ 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

² 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要: 以我国南水北调中线引水工程水源地所在的伏牛山区为例, 测算、分析了 1990—2015 年土地利用变化和生态系统服务价值 (ESV), 在此基础上探究土地利用变化对 ESV 的影响。结果表明: (1) 研究期间, 伏牛山区建设用地大幅增加, 耕地和草地大幅下降, 耕地和建设用地相互均有较大规模转换。(2) 林地是伏牛山区最主要的生态用地, 调节服务和支持服务构成了伏牛山区 ESV 的主体; ESV 高值区分布于伏牛山区中部高海拔林区, 低值区分布于周围地势较平坦的耕地和建设用地区域; 除林地、水域和未利用地 ESV 有小幅增加外, 其他地类的 ESV 均快速减少, 致使伏牛山区生态系统服务总价值减少。(3) ESV 损失区域主要分布于各县的城镇边缘区以及栾川县的采矿区, 可通过保护林地和水域、退耕还林、农居点整理、绿色矿山等土地调控政策提高生态服务价值。将土地利用变化图谱与 ESV 变化热点分析结合, 可为从空间上研究土地利用变化对生态系统服务价值的影响提供新的研究框架, 为伏牛山区土地利用精准调控提供政策依据。

关键词: 土地利用变化; 生态系统服务价值; 热点分析; 格网; 伏牛山区

Effects of land use change on ecosystem service value in Funiu Mountain based upon a grid square

GUO Chunyang¹, GAO Shang², ZHOU Boyan¹, GAO Jianhua^{1,*}

¹ College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

² School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xian 710119, China

Abstract: We studied the Funiu Mountain, which is the water source of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project in China, as a case example to analyze the characteristics of land use change and ecosystem service value (ESV) from 1990 to 2015 and explore the impact of land use change on ESV. The results were as follows. (1) During the study period, the construction land increased greatly, the cultivated land and grassland decreased greatly, and its extensive replacement with construction and cultivated land has occurred. (2) Forest land was the main ecological land, and the regulation service and support services were the main structure of the ESV of Funiu Mountain. The ESV high-value areas were distributed in the middle high altitude forest areas, and ESV low-value areas were distributed in the surrounding flat areas, which were mainly composed of cultivated land and construction land. Except for the slight increase of the ESV in forestland, water land, and unused land, the ESV of other land types decreased rapidly, resulting in the decrease of the ESV. (3) The ESV loss areas were mainly distributed in urban fringe of each county and the mining area of Luanchuan. The ESV could be improved by protecting forest land and water areas, returning cultivated land to forest land, sorting out rural

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771142); 教育部人文社科重点研究基地重大项目 (11JJD790017)

收稿日期: 2018-03-21; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhgao@henu.edu.cn

residential land, and building green mines. Combining land use change maps with ESV change hotspot analysis could provide a new research framework for spatially studying the impact of land use change on ecosystem service value. This result could provide the basis for policy for land regulation in Funiu Mountain.

Key Words: land use change; ecosystem service value; hotspot analysis; grid square; Funiu Mountain

生态系统服务是指人类通过生态系统结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[1],以满足生存、健康、福祉等多种需求^[2]。联合国千年生态系统评估计划指出,全球 60%的生态系统正在或已经退化,其中人类活动是主要诱因之一^[3]。土地利用变化(Land Use Change, LUC)是人类活动作用于生态系统的重要方式^[4],通过影响生态系统的格局与过程,改变着生态系统产品与服务的供给^[5],对生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)起决定性作用。随着全球土地计划、生态系统和生物多样性经济学项目计划、生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台等一系列国际项目的实施,极大推动了土地利用变化与生态系统服务研究的融合^[6],以土地利用变化为视角评估生态系统服务价值,已经成为全球变化研究领域的核心命题之一^[7]。

目前国内外关于 LUC 对 ESV 影响研究取得了较为丰富的成果。如石龙宇等^[8]将土地利用强度指数与 ESV 进行相关分析, Song 等^[9]通过弹性指数衡量 LUC 对 ESV 的影响,但此类定量研究没有考虑不同土地利用类型及其变化对 ESV 的影响。又如 Blumstein 等^[10]、Lawler 等^[11]、魏慧等^[12]通过分析土地利用和生态系统服务价值的变化,研究目标区域 LUC 对 ESV 的影响。此类研究虽然弥补了上述定量研究的不足,但大多从土地利用类型的数量变化角度入手,忽略了土地利用变化与生态系统服务价值的空间作用关系。显而易见,土地利用变化受自然、经济、政策等因素的影响,具有很强的空间差异性,不同空间区位上的土地利用变化对生态系统服务价值的影响不尽相同。而传统的土地利用转移矩阵仅能描述研究区土地利用类型和面积的变化,缺乏对土地利用变化空间属性的考虑,因此如何从空间上解析土地利用变化对生态系统服务的影响,成为本文拟解决的关键问题。目前已有一些学者开始关注这一研究方向,如 Lukas 等^[13]、Camacho 等^[14]强调在进行土地利用变化与生态系统服务价值研究时不能忽略空间因素的作用,但他们在研究中仅考虑了生态系统服务价值的空间变化,忽略了土地利用变化的空间特征,导致结果有所偏颇。Arowolo 等^[15]、姜忆涓等^[16]、Li 等^[17]虽然考虑了土地利用的空间变化,但未将其与生态系统服务价值空间变化有机结合。土地利用变化图谱能够以图谱单元来记录土地利用变化的时空复合信息^[18],对土地利用变化的空间位置和空间行为具有很好的指示性^[19];热点分析能够有效表达 ESV 的空间变化特征,因此将二者结合能够从空间层面上较好反映 LUC 对 ESV 的影响。

伏牛山区位于我国第二阶梯向第三阶梯过渡带,是我国南北地理分界线的一部分,是南水北调中线引水工程渠首所在地,是丹江口水库最重要的水源涵养林区,承载着极重要的生态功能。20 世纪 90 年代以来,在快速城镇化背景下,伏牛山区土地利用变化剧烈,深刻影响着区域生态系统结构和功能。因此,研究 LUC 对 ESV 的影响对于指导伏牛山区土地资源开发利用和生态环境保护具有重要的理论意义和现实价值。本研究在分析伏牛山区 1990—2015 年土地利用变化和生态系统服务价值的基础上,利用土地利用转移矩阵、土地利用变化图谱和 ESV 热点分析工具,在格网尺度上探究土地利用数量变化和空间变化对生态系统服务价值的影响。研究的创新之处在于分析不同空间区位上生态服务价值增减的主要土地利用类型及原因,为伏牛山区土地利用精准调控提供技术支撑,为提高生态服务价值提出针对性对策提供理论依据。

1 研究区概况

伏牛山位于河南省西南部,属北亚热带向暖温带的过渡带,年均气温 13.6—15.1℃,年均降水量 700—1100 mm,是河南省境内平均海拔最高、自然生态保存完好的山区。伏牛山区是北亚热带山地生态环境标志

地,生物资源丰富,对于维护区域生态环境有不可替代的作用。行政区划上,伏牛山区包括三门峡的卢氏县,洛阳的栾川县、嵩县、汝阳县,南阳的淅川县、西峡县、内乡县、南召县,平顶山的鲁山县,总面积 24058 km²,总人口 541 万人。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

伏牛山区 1990—2015 年的土地利用分类矢量图由中国科学院资源环境科学数据中心提供(<http://www.resdc.cn>),解译精度达 90%以上,该系列数据将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地。行政区划数据来源于黄河下游科学数据中心(<http://henu.geodata.cn>)。统计数据来源于《河南省统计年鉴》、《中国农产品价格调查年鉴》。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化测算

土地利用变化测算方法多样,本文选取土地利用数量变化和转移矩阵进行测度。土地利用转矩阵用以描述研究初期和末期区域土地利用类型间的转化情况,可以揭示土地利用类型之间的转移方向和性质^[20],表达式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}$$

(1)

式中, S 为各地类面积, n 为土地利用类型数, i,j 分别为研究初期和末期土地利用类型。

2.2.2 生态系统服务价值测算

(1)生态系统服务价值评估方法。ESV 评估方法多样,可概括为单位服务功能价格法和基于单位面积价值当量因子法^[21]。其中当量因子法最早由 Costanza^[22]等学者提出,后经国内学者谢高地等人修改,得出中国的生态系统服务价值当量^[23]。由于该方法使用简便、数据需求少、评估结果可比性高,现已成为评估 ESV 最常用的方法,被大多数学者采用。本文也选用此方法进行评估,并根据单位面积农田粮食生产的经济价值量^[24]和区域修正系数(河南省为 1.39),对生态服务价值当量进行修正。最终得出伏牛山区生态系统服务价值评估系数表(表 1),表中建设用地价值系数,主要参考赵江等^[25]、张骞等^[26]的研究成果。

表 1 伏牛山区生态系统服务价值系数表/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 1 Coefficients of the ESV in Funiu Mountain

一级类型 First category	二级类型 Second category	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water land	建设用地 Built land	未利用地 Unused land
供给服务	食物生产	1615.1	532.9	694.5	856.0	0.0	32.3
Provisioning services	原材料生产	629.9	4813.0	581.4	565.3	0.0	64.6
调节服务	气体调节	1162.9	6977.2	2422.7	823.7	0.0	96.9
Regulating services	气候调节	1566.7	6573.5	2519.6	3327.1	0.0	209.9
	水文调节	1243.6	6605.8	2454.9	30315.5	-28264.3	113.0
	废物处理	2244.9	2777.9	2131.9	23984.3	-9421.4	419.9
支持服务	土壤保持	2374.2	6492.7	3617.8	662.2	0.0	274.6
Supporting services	生物多样性	1647.4	7284.1	3020.2	5539.8	0.0	646.1
文化服务 Cultural services	提供美学景观	274.6	3359.4	1405.1	7171.1	0.0	387.6

ESV:生态系统服务价值,Ecosystem Service Value

生态系统服务价值计算公式如下:

$$ESV = \sum_{k=1}^n (A_k \times VC_k) \quad ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (2)$$

式中, ESV 为生态系统服务价值, A_k 是土地利用类型 k 的面积, VC_k 是生态系统服务价值系数, ESV_f 为第 f 项生态系统服务价值, VC_{fk} 是第 k 种土地利用类型第 f 项服务价值系数。

(2) 生态系统服务价值热点分析。热点分析可用于探究 ESV 空间变化是否具有高值集聚(热点)和低值集聚(冷点)的现象, 以及确定高值区和低值区在空间上发生聚类的位置, 公式如下^[27]:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j - \bar{X} \sum_{i=1}^n W_{ij}}{\sqrt{\left[n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \right)^2 \right] / (n-1)}} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\bar{X})^2}$$

若某范围内 ESV 变化量与周围相比高出较多时, 则成为具有显著统计学意义的热点, 称为 ESV 增值热点区, 表示生态系统服务价值在该区增幅较大; 若某范围内 ESV 变化量与周围相比低较多时, 则成为具有显著统计学意义的冷点, 称为 ESV 损失冷点区, 表示生态系统服务价值在该区减幅较大。

2.2.3 土地利用变化对生态系统服务价值的影响测算

此项研究包含两方面: 一是土地利用数量变化对 ESV 的影响, 二是土地利用空间变化对 ESV 的影响。前者的基础数据为土地利用转移矩阵, 据此计算得到 ESV 转移矩阵。后者的基础数据为土地利用变化图谱和 ESV 变化热点图, 通过二者的叠加探究空间维度下 LUC 对 ESV 的影响。其中 LUC 对 ESV 的影响程度通过贡献率这一指标来衡量, 公式如下:

$$\rho = \frac{ESV_o}{\Delta ESV} \quad (4)$$

式中, ρ 为贡献率, ESV_o 为各土地利用类型变化所导致的生态系统服务价值增(减)量, ΔESV 为所有土地利用变化导致的生态系统服务价值总增(减)量。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 土地利用数量变化分析

对土地利用数据中各地类面积进行统计, 得到伏牛山区各地类面积(表2)。从用地结构看, 伏牛山区最主要的地类是林地, 占整个研究区域的 56.43%, 其次是耕地, 占 28.17%。从用地变化看, 以建设用地、耕地、草地的变化为主, 其中建设用地大幅增加, 面积扩大 22101 hm^2 ; 耕地和草地大幅度下降, 面积分别减少 12505、12376 hm^2 。造成这种变化的原因主要有两个: 一是随着 20 世纪 90 年代以来我国经济的迅速发展, 伏牛山区为了发展经济、提升城镇化水平, 城镇建设用地和农村居民点用地迅速扩张并占用大量耕地、草地等生态用地。二是受退耕还林政策影响, 伏牛山区一部分坡度较大的耕地转移为林地。

3.1.2 土地利用转移分析

运用 ArcGIS 的分析工具得到 1990—2015 年土地利用转移矩阵(表3)。伏牛山区土地利用转移主要特点如下: (1) 耕地转入与转出面积最多, 分别为 38021.95、50580.69 hm^2 , 其中主要转入源为草地、林地和建设用地, 主要转出源为建设用地。(2) 建设用地转入转出面积不大, 但转入面积与转出面积相差最多, 其中转入面积 32435.00 hm^2 , 转出面积 10343.77 hm^2 , 二者相差 22091.23 hm^2 , 建设用地的主要转入源为耕地, 主要转出

源也为耕地,说明伏牛山区建设用地与耕地的置换规模、建设用地对耕地的占用面积都较大。

表 2 1990—2015 年伏牛山区土地利用类型面积和生态系统服务价值
Table 2 Land use areas and ESV of Funiu Mountain from 1990 to 2015

土地利用类型 Land use types		1990	1995	2000	2005	2010	2015
耕地 Cropland	面积/hm ²	690258	680030	707052	696161	685116	677753
	ESV/亿元	88.07	86.77	90.22	88.83	87.42	86.48
林地 Forestland	面积/hm ²	1356803	1477922	1357613	1357140	1358347	1357646
	ESV/亿元	616.21	671.22	616.58	616.37	616.92	616.60
草地 Grassland	面积/hm ²	250813	139849	235108	236640	239357	238437
	ESV/亿元	47.27	26.37	44.31	44.6	45.11	44.94
水域 Water land	面积/hm ²	72075	61424	65543	73591	72708	73432
	ESV/亿元	52.79	44.94	48.01	53.9	53.25	53.79
建设用地 Built land	面积/hm ²	35833	45885	40470	42255	50260	57934
	ESV/亿元	-13.5	-17.29	-15.25	-15.92	-18.94	-21.83
未利用地 Unused land	面积/hm ²	9	681	5	5	3	589
	ESV/亿元	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01

表 3 1990—2015 年伏牛山区土地利用和生态系统服务价值转移矩阵
Table 3 Land use and ESV transfer matrix of Funiu Mountain from 1990 to 2015

		1990					
		耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water land	建设用地 Built land	未利用地 Unused land
2015 耕地 Cropland	面积/hm ²	—	10963.46	11465.68	5479.26	10111.18	2.37
	ESV/亿元	—	-3.58	-0.7	-3.31	5.1	0
林地 Cropland	面积/hm ²	7484.51	—	13918.72	85.66	149.79	0.00
	ESV/亿元	2.44	—	3.7	-0.02	0.12	0
草地 Cropland	面积/hm ²	8610.92	5715.28	—	1557.47	34.21	0.00
	ESV/亿元	0.52	-1.52	—	-0.85	0.02	0
水域 Water land	面积/hm ²	6523.36	1194.37	946.47	—	48.59	0.00
	ESV/亿元	3.95	0.33	0.51	—	0.05	0
建设用地 Built land	面积/hm ²	27903.37	2349.07	1949.84	228.87	—	3.85
	ESV/亿元	-14.08	-1.95	-1.1	-0.25	—	0
未利用地 Unused land	面积/hm ²	58.53	530.35	0.00	0.00	0.00	—
	ESV/亿元	-0.0062	-0.23	0	0	0	—

3.2 生态系统服务价值分析

3.2.1 生态系统服务价值测度

根据伏牛山区土地利用数据和表 1,得 ESV 变化表(表 2,表 4)。结果表明,研究期内伏牛山区 ESV 呈波动下降趋势,25 年间下降了 10.85 亿元。

从不同土地利用类型的生态价值上看(表 2),林地价值最高,占总价值量的 77.97%;其次是耕地、水域、草地,分别占总价值量的 10.94%、6.80%、5.68%;未利用地的价值近乎为 0;建设用地的价值量为负值,是唯一具有负向生态效应的地类。研究期内,不同地类的 ESV 表现出不同的变化特征。其中建设用地 ESV 减少了 8.33 亿元,减幅最大,主要由于建设用地快速扩张导致;水域 ESV 增加了 1 亿元,增幅最大,主要是由于南水北调中线工程建设使水域面积增加所致。

从不同服务功能的生态价值上看(表 4),调节服务价值最高,占总价值量的 50.24%,其次为支持服务、供给服务和文化服务,分别占 29.67%、11.62%、7.09%。研究期内这四项服务的价值有不同程度减少,其中调节

服务减少最多,为 9.28 亿元,文化服务减少最少,为 0.08 亿元。调节服务的主要供给源为林地和水域,对于以林地为主的伏牛山区来说,调节服务在整个生态系统中处于优势地位;调节服务的损失源是建设用地,未来一定时期伏牛山区建设用地仍会继续增加,将对调节服务造成持续的负向影响。

表 4 1990—2015 年伏牛山区不同服务功能的生态系统服务价值/亿元

Table 4 ESV of different service functions of Funiu Mountain from 1990 to 2015

一级类型 First category	二级类型 Second category	1990	1995	2000	2005	2010	2015
供给服务	食物生产	20.74	20.36	20.85	20.75	20.59	20.47
Provisioning services	原材料生产	71.52	76.58	71.53	71.50	71.50	71.42
调节服务	气体调节	109.36	114.92	109.18	109.13	109.14	108.99
Regulating services	气候调节	108.72	113.37	108.42	108.53	108.47	108.32
	水文调节	116.09	115.15	112.68	114.48	111.96	109.86
	废物处理	72.45	69.70	70.51	72.04	70.92	70.17
支持服务	土壤保持	114.03	117.57	113.87	113.69	113.60	113.35
supporting services	生物多样性	121.77	126.49	121.27	121.55	121.49	121.33
文化服务 Cultural services	提供美学景观	56.17	57.89	55.55	56.11	56.09	56.09
总计 Total		790.85	812.03	783.87	787.77	783.76	779.99

3.2.2 生态系统服务价值时空分异特征

为了从更精细的角度分析伏牛山区 ESV 时空分异特征,本研究选择格网为研究单元。参考相关研究中的格网构建文献,发现常用的格网单元有 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ ^[28]、 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ^[29]、 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ ^[30]、 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ ^[31]、 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ ^[32]等。为了考虑最小可塑性单元对研究结果的影响,本文比较了不同格网尺度下 ESV 时空格局特征及其差异,发现 5 km 格网尺度以下的分析结果总体上较为一致,能够表达出伏牛山区 ESV 分布特征。考虑到图幅限制,且为了能够凸显伏牛山区 ESV 的空间差异性,在多次调整格网大小后拟定 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的格网为基本研究单元。

自然断点法在数值差异相对较大处设置边界,对相似值进行恰当分组,使各组数据之间差异最大化,能够有效表征要素的空间分异特征^[33]。据此本文在计算每个格网的 ESV 后,利用 ArcGIS 的重分类工具采用自然断点法将伏牛山区 ESV 从低到高划分为 5 个等级(一级、二级、三级、四级、五级),一级最低,五级最高,得到 ESV 的时空格局图(图 1)。

图 1 可以看出,伏牛山区 ESV 存在着明显的中部高、周围低的空间分异特征,即中部海拔较高的 ESV 高值区(主要地类为林地、草地)和周边地势较为平坦的 ESV 低值区(主要地类为耕地和建设用地)。具体到行政区来说,栾川、嵩县和西峡的 ESV 明显高于其他区域,主要由于这些区域良好的自然生态本底,平衡了其建设用地扩张所带来的生态系统服务价值量的损失;而内乡、淅川和鲁山 ESV 较低,一方面因为建设用地所占比例较大,另一方面由于其以生态价值相对较低的耕地为主。

3.2.3 生态系统服务价值变化热点分析

为了分析伏牛山区 ESV 变化程度的空间分布,以上文的格网为单元,以 ArcGIS 中的热点分析为研究工具,在所得结果中选取置信度在 95%以上的具有统计显著性的热点和冷点,得到伏牛山区 1990—2015 年 ESV 变化热点图(图 2)。

从图 2 可以看出:(1)1990—2000 年,ESV 增值热点区和损失冷热点区分布范围较大,说明此期间伏牛山区 ESV 变化比较剧烈,且冷热点的空间位置转换具有明显的对应关系。其中卢氏中部,嵩县和汝阳北部交界地带,西峡、内乡和淅川交界地带,以及鲁山、南召和内乡从 1990—1995 的热点区转换为 1995—2000 的冷点区;卢氏北部、栾川北部、嵩县和汝阳南部交界地带从冷点区转换为热点区。出现这一现象的主要原因是此期间林地和草地的相互转换。(2)2000—2015 年,ESV 增值热点区和损失冷点区分布范围较小,比较而言 ESV

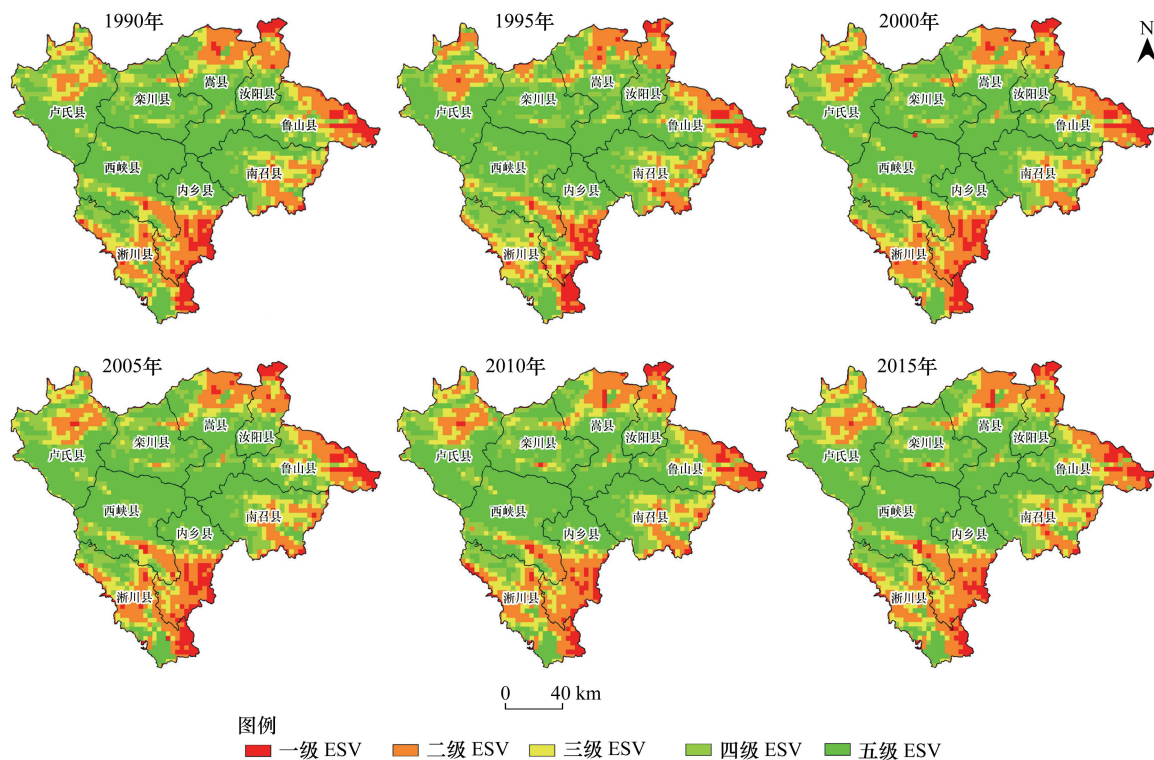


图 1 1990—2015 年伏牛山区生态系统服务价值的空间分异

Fig.1 Spatial differences of ESV in Funiu Mountain from 1990 to 2015

变化相对平缓。其中 ESV 增值热点区 2000—2010 年主要分布于南召、鲁山和淅川,2010—2015 年主要分布于卢氏、栾川、鲁山和淅川;ESV 损失冷点区 2000—2005 年主要分布于栾川、西峡和淅川,2005—2015 年分布于除汝阳外的各个县域。(3)从整体来看,1990—2015 年伏牛山区 ESV 增值热点区主要分布在鲁山和南召,冷点区主要分布在卢氏、栾川、西峡、淅川。加强冷点区县域生态系统的监测和保护,严格控制冷点区范围,引导冷点区生态价值较低的地类向价值较高地类转变,是提高伏牛山区 ESV 的有效途径。

3.3 土地利用变化对生态系统服务价值的影响

3.3.1 土地利用数量变化对生态系统服务价值的影响

通过土地利用转移矩阵计算得到 1990—2015 年伏牛山区生态系统服务价值转移矩阵(表 3),以此分析土地利用数量变化对 ESV 的影响。结果表明:建设用地转耕地、耕地转水域、草地转林地是主要的生态服务增值类型,分别使 ESV 提高了 5.10、3.95、3.70 亿元,对生态服务价值增加的贡献率分别为 30.44%、23.55%、22.07%;耕地转建设用地是最主要的生态服务减值类型,使 ESV 减少了 14.08 亿元,贡献率达 50.99%,林地转耕地以及水域转耕地也是较主要的生态服务减值类型,分别导致 ESV 下降 3.58、3.31 亿元,贡献率分别为 12.97%、12.01%。

进一步分析发现,对生态系统服务功能起改善作用的主要有建设用地转耕地、耕地转水域以及草地转林地,共使 ESV 提高了 16.76 亿元,而在对生态系统服务功能起降低作用的土地利用变化中,仅耕地转建设用地就使 ESV 损失了 14.08 亿元,说明耕地向建设用地的过度转化是导致伏牛山区 ESV 降低的主要原因。

3.3.2 土地利用空间变化对生态系统服务价值的影响

将土地利用变化图谱与 ESV 变化热点图叠加(图 3,图中 H 和 C 分别代表热点和冷点),对伏牛山区 1990—2015 年冷热点区域土地利用变化进行分析,并根据贡献率选取对 ESV 影响较大的土地利用变化类型,结果见图 4、图 5。

图 3、图 4 表明,1990—2000 年期间,主要是耕地、林地、草地和水域之间的转移引起 ESV 变化。其中栾川

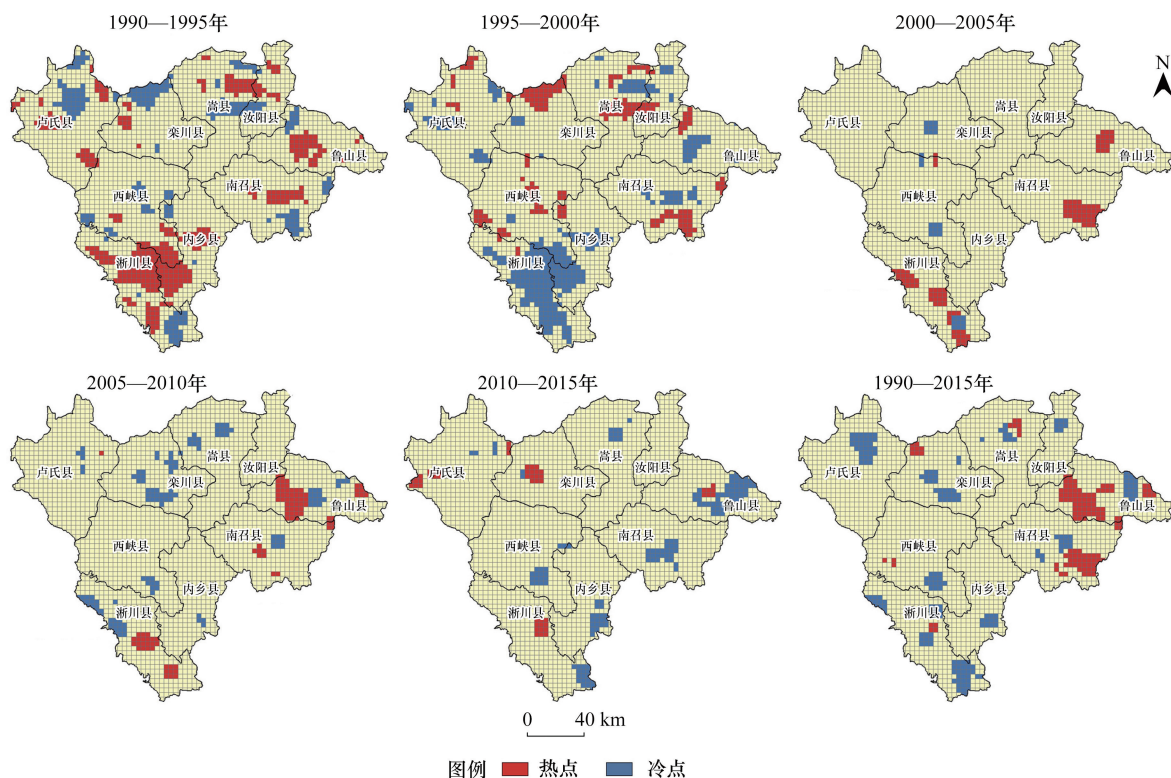


图2 伏牛山区 1990—2015 年生态系统服务价值变化热点区空间分布格局

Fig.2 Hot spots spatial distribution pattern of ESV changes in Funiu Mountain from 1990 to 2015

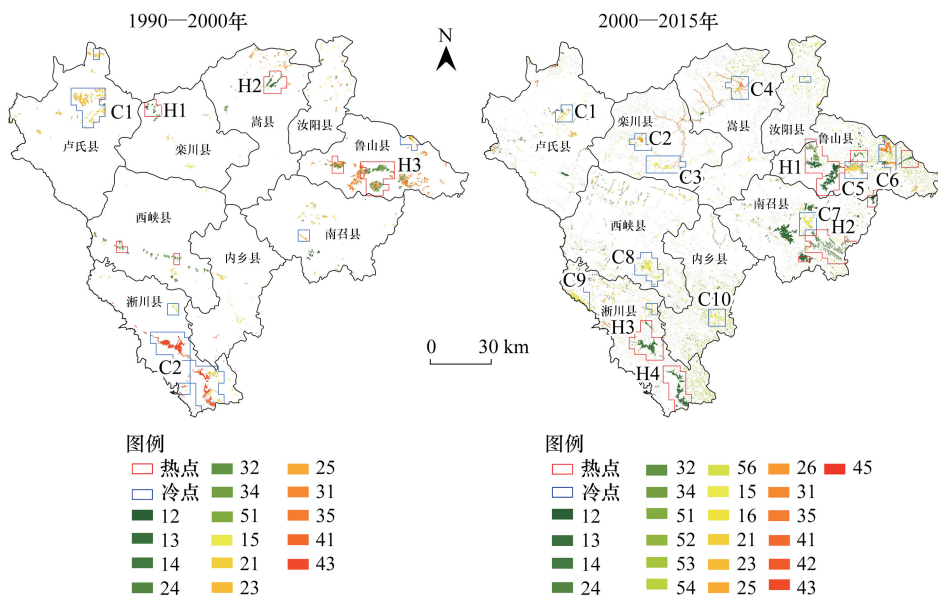


图3 1990—2015 年伏牛山区土地利用变化图谱

Fig.3 Geo-spectrum of land use change in Funiu Mountain from 1990 to 2015

12:耕地转林地;13:耕地转草地;14:耕地转水域;15:耕地转建设用地;16:耕地转未利用地;21:林地转耕地;23:林地转草地;24:林地转水域;25:林地转建设用地;26:林地转未利用地;31:草地转耕地;32:草地转林地;34:草地转水域;35:草地转建设用地;41:水域转耕地;42:水域转林地;43:水域转草地;45:水域转建设用地;51:建设用地转耕地;52:建设用地转林地;53:建设用地转草地;54:建设用地转水域;56:建设用地转未利用地

县、嵩县和鲁山县主要表现为 ESV 的增加,其增加主要源于草地转林地以及耕地转水域;卢氏县和淅川县主要表现为 ESV 的减少,其减少主要源于林地转耕地和水域转耕地。

图 3、图 5 表明,2000—2015 年期间,南召县和淅川县 ESV 增加主要源于耕地转水域,ESV 减少主要源于耕地转建设用地;卢氏县、内乡县和西峡县 ESV 增加和减少分别源于建设用地转耕地、耕地转建设用地;栾川县 ESV 增加较少,减少较多,其减少主要源于耕地和未利用地转建设用地;鲁山县 ESV 增加主要源于耕地转林地,ESV 减少主要源于耕地和草地转建设用地;嵩县 ESV 增加主要源于建设用地转耕地,ESV 减少主要源于水域转耕地和耕地转建设用地。

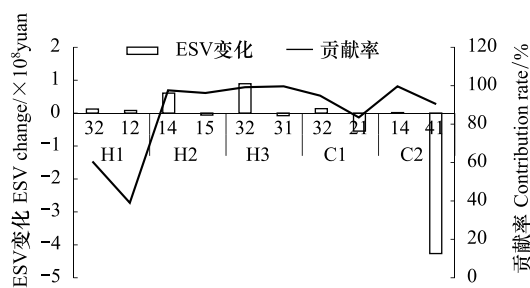


图 4 1990—2000 年冷热点区域土地利用变化对生态系统服务价值影响

Fig.4 The effect of land use change on ESV in hot spots and cold spots from 1990 to 2000

H1:1990—2000 年 ESV 变化热点 1;H2:1990—2000 年 ESV 变化热点 2;H3:1990—2000 年 ESV 变化热点 3;C1:1990—2000 年 ESV 变化冷点 1;C2:1990—2000 年 ESV 变化冷点 2

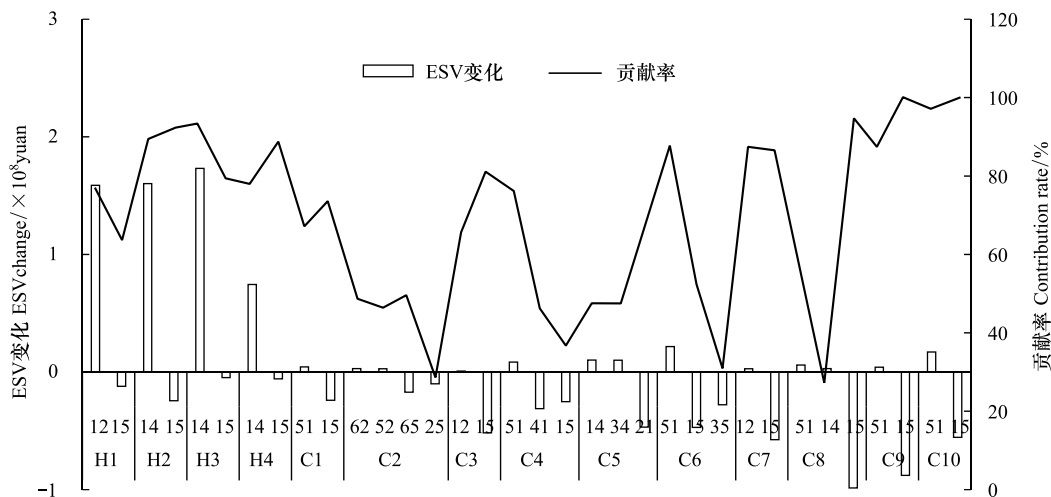


图 5 2000—2015 年冷热点区域土地利用变化对生态系统服务价值影响

Fig.5 The effect of land use change on ESV in hot spots and cold spots from 2000 to 2015

H1:2000—2015 年 ESV 变化热点 1;H2:2000—2015 年 ESV 变化热点 2;H3:2000—2015 年 ESV 变化热点 3;H4:2000—2015 年 ESV 变化热点 4;C1:2000—2015 年 ESV 变化冷点 1;C2:2000—2015 年 ESV 变化冷点 2;C3:2000—2015 年 ESV 变化冷点 3;C4:2000—2015 年 ESV 变化冷点 4;C5:2000—2015 年 ESV 变化冷点 5;C6:2000—2015 年 ESV 变化冷点 6;C7:2000—2015 年 ESV 变化冷点 7;C8:2000—2015 年 ESV 变化冷点 8;C9:2000—2015 年 ESV 变化冷点 9;C10:2000—2015 年 ESV 变化冷点 10

4 讨论

4.1 土地利用变化对生态系统服务价值影响

耕地具有生产有机质、气体调节、水源涵养、土壤保持、环境净化、休闲娱乐、文化教育等生态功能,是重要的生态景观和人类生存最重要的生产资源^[34]。然而随着城镇化进程的加快,伏牛山区大面积耕地被占用而转化为建设用地,从而导致生态服务功能减弱。研究期内,伏牛山区有 117315.18 hm²的土地发生了变化,占整个研究区总面积的 4.88%,耕地转移为建设用地是最主要的土地利用变化类型,占土地利用变化总面积的 23.78%。其中耕地转移为建设用地的净面积达到 17792.19 hm²,由此导致生态系统服务价值下降 8.98 亿元,占伏牛山区 ESV 下降总额的 82.76%,是伏牛山区 ESV 最主要的损失源。

正如本文引言部分所述,从土地利用数量转移的角度进行分析虽然可以从整体上把握 LUC 对 ESV 的影

响,但由于土地利用变化的空间差异性,导致其所影响的生态系统服务价值变化也表现出明显的空间差异特征。倘若仅从土地数量转移的角度考虑,易造成对整个区域实施无差别的土地利用优化政策,不能针对性地保护和提升区域生态系统服务价值。而从空间角度分析土地利用变化对生态系统服务价值的影响,就能够有效弥补上述不足,针对性地进行土地利用空间调控,因地制宜提高区域生态服务价值。我们通过从空间格网角度研究 LUC 对 ESV 的影响,发现伏牛山区土地利用变化对生态系统服务价值影响较大的空间区域主要有以下三个:

(1)严格控制区:城镇与农村居民点建设用地区。伏牛山区是我国集中连片特困地区之一,随着城镇化的不断推进,在该区域发展过程中,城镇扩张、工业发展等不可避免侵占城镇边缘地区的农业用地和生态用地,从而造成城镇边缘区生态系统服务价值降低。且从用地变化趋势来看,目前城镇建设用地尚处在不断扩张过程中,故而城镇边缘区将继续遭受严重的生态扰动。对于农村居民点,一方面伏牛山区人均宅基地面积普遍超标,另一方面在城镇化的过程中,大量农村人口的非农转移及生计兼业化,“空心村”现象比较严重。未来一定时期内,严格控制城镇用地规模、存量城镇建设用地的内部挖潜、将农村居民点整理与城乡建设用地指标流动相结合、置换城乡建设用地空间是提高伏牛山区各县市生态服务价值的有效方法。

(2)保护强化区:库区及退耕还林区。受南水北调中线工程施工的影响,研究期间位于淅川县的丹江口库区及其周围部分耕地转移为水域、林地,因此形成了 ESV 增值热点区。虽然随着南水北调中线工程的建成与运行,伏牛山区库区水域、林地面积基本维持稳定,无法通过增加水域和林地面积大幅度提高 ESV。但水域是生态价值系数最高地类,林地是伏牛山区面积最大的生态用地,二者对于维护伏牛山区生态系统功能十分重要,故此在今后的土地利用规划中需将保护水域和林地作为重中之重。退耕还林有利于缓解水土流失、保护和改善生态环境,在研究区鲁山县坡度较高的山地实施退耕还林工程形成了 ESV 增值热点区。但对于伏牛山区其他县域,虽然也实施了退耕还林政策,但由于具体退耕地块的规模较小、空间上较为分散、林地转移为耕地的“对冲”以及监管不到位的复耕等,并未形成 ESV 增值热点区。对此各县域在今后的土地利用中一方面要继续实施 2016 年以来的国家新一轮的退耕还林政策,另一方面通过实施全域性的农村土地综合整治,以补充耕地为第一原则,服务于我国粮食安全战略。

(3)生态恢复区:采矿区。该区主要指伏牛山区的矿产资源开采区,尤其是作为我国十六个重要的有色金属成矿区带之一的栾川县,改革开放以来大力发展矿业经济,带来了巨大经济效益和社会效益的同时严重威胁着生态环境。具体表现为矿区占压土地及开采后不重视土地的治理和修复,降低了生态系统服务价值,形成生态脆弱敏感区和地质灾害易发区,给生态系统造成了较大程度的破坏,是需要进行生态恢复的重点区域。

土地利用变化深刻影响着生态系统的结构和功能^[35-36]。故可以通过相应的政策调控措施来调整区域土地利用结构,有效减少对生态系统的破坏,进而提高生态服务价值。通过研究伏牛山土地利用变化对生态系统服务价值的影响,我们提出以下几点对策建议:(1)林地是伏牛山区生态用地主体,水域是生态价值系数最高地类,应加强对二者的保护,尤需加强淅川县丹江口库区和南水北调中线工程沿线的生态屏障建设,提高森林覆盖率、保护水源质量。(2)各地政府管理部门应严格控制建设用地规模,加强对建设用地的动态监测与预警,继续深入开展农村居民点整治和城乡建设用地增减挂钩工作,提高建设用地的集约利用程度。(3)各县域要继续实施新一轮的退耕还林政策,并进行长期动态监测,避免退耕林地的二次复耕,与此同时采取行政、经济、法律、技术等多种手段补充耕地,有效增加耕地存量。(4)栾川县应加大绿色矿山建设力度,有效治理由于采矿形成的岩石裸露区,优先将采矿废弃地复垦为生态用地。

4.2 ESV 估算及 LUC 对 ESV 影响方法

ESV 估算方法大致分两类,分别是基于单位服务功能价格法和基于单位面积价值当量因子法。考虑到功能价格法输入参数较多、计算过程复杂且对每种服务价值的参数标准难以统计^[37]。而当量因子法较为直观易用,数据需求少,特别适用于区域和全球尺度生态系统服务价值的评估^[38]。故本文选择当量因子法对伏牛

山区生态系统服务价值进行估算。在当量因子法中,本文选择不变的生态系统价值系数,主要基于以下两点考虑:一是通过保持价值系数在时间上的一致,有利于生态系统服务价值时间序列的可比性分析;二是生态系统服务价值由各土地利用类型的面积和生态系统价值系数共同决定,保持价值系数在时间上的一致性,更能凸显土地利用变化对生态系统服务价值的作用。但由于生态系统的复杂性、动态性和非线性特征,当量因子法也存在一些局限^[39-40]。其一,对于同一土地利用类型的二级地类(如林地中的有林地、灌木林、疏林地等),生态服务价值系数客观上存在一定差异。如果对土地利用类型细分,赋予与其生态功能相一致的价值系数,那么评估结果将更接近现实。其二,生态系统服务价值由各土地利用类型的面积和生态服务当量共同决定,对土地利用数据的准确性要求较高。若能通过更高分辨率的遥感影像获取数据,那么将大大提高研究结果的精度。

自 20 世纪 90 年代以来,国内外众多学者围绕 LUC 对 ESV 的影响问题做了大量研究。但对于从空间角度分析 LUC 对 ESV 的影响,目前还未有行之有效的方法。本文尝试将土地利用变化图谱和 ESV 变化热点结合,力图在空间上直观展示 LUC 对 ESV 的影响。这种半定量的方法虽不能完全刻画 LUC 和 ESV 的空间关系,但成为探究土地利用变化对生态系统服务影响的一种有益尝试。此外这种空间关系的研究可以详细剖析微观区域 LUC 对 ESV 的影响,为伏牛山区不同县域提出针对性的土地利用优化方案提供技术支撑。

5 结论

本文以我国主要的生态功能区伏牛山区为研究区,从格网尺度分析了 1990—2015 年土地利用变化对生态系统服务价值的影响,结果表明:

(1)土地利用变化方面,随着城镇化进程的加快,伏牛山区土地利用发生了显著变化。从土地利用数量变化上看,研究期内林地、水域、建设用地和未利用地增加,其中建设用地面积增加最多,为 22101 hm²;耕地、草地减少,其中耕地减少最多,为 12505 hm²。从土地利用转移上看,研究时段内各类用地转换较为频繁,尤以耕地和建设用地相互转换的面积最大、范围最广。

(2)生态系统服务价值方面,林地是伏牛山区 ESV 的最主要构成部分,其次为耕地、水域和草地。在 ESV 的空间分布上,ESV 高值区集中于伏牛山区中部高海拔林区,低值区分布于周围地势比较平坦的耕地和建设用地区域;在 ESV 的时间变化上,研究期间除林地、水域和未利用地 ESV 有小幅增加外,其他用地类型的 ESV 均快速减少,致使生态系统服务总价值减少。

(3)土地利用变化对生态系统服务价值影响方面,土地利用数量转移和空间变化决定了伏牛山区生态要素素质和量的分布,从而影响生态系统服务的发展演变方向和分布格局。从土地利用数量转移上看,研究期内伏牛山区大面积耕地转移为建设用地,从而导致水文调节功能和废物处理功能大幅度下降,造成 ESV 减少。从土地利用空间变化上看,研究期内伏牛山区丹江口库区耕地转移为水域与林地、鲁山县耕地转移为林地形成了 ESV 增值热点区;各县城镇边缘区耕地转移为建设用地以及栾川县采矿区林地转移为建设用地形成了 ESV 损失冷点区。

(4)仅从土地利用数量变化分析其对 ESV 的影响,掩盖了二者的空间作用关系。本文将土地利用变化图谱与 ESV 变化热点分析相结合并展布到较小尺度的格网空间,可以有效反映 LUC 对 ESV 的影响,为在空间上研究 LUC 与 ESV 的相互作用提供了新的研究框架。

参考文献(References):

- [1] 王宗明, 张柏, 张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报, 2004, 19(1): 55-61.
- [2] 涂小松, 龙花楼. 2000-2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化. 资源科学, 2015, 37(12): 2451-2460.
- [3] 甄霖, 刘雪林, 李芬, 魏云洁, Koenig H. 脆弱生态区生态系统服务消费与生态补偿研究: 进展与挑战. 资源科学, 2010, 32(5): 797-803.
- [4] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990-2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [5] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.

- [6] 李双成, 王珏, 朱文博, 张津, 刘娅, 高阳, 王阳, 李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. 地理学报, 2014, 69(11): 1628-1639.
- [7] 陈美球, 赵宝苹, 罗志军, 黄宏胜, 魏晓华, 吕添贵, 许莉. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化. 生态学报, 2013, 33(9): 2761-2767.
- [8] 石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 刘江. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. 地理学报, 2010, 65(6): 708-714.
- [9] Song W, Deng X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [10] Blumstein M, Thompson J R. Land-use impacts on the quantity and configuration of ecosystem service provisioning in Massachusetts, USA. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4): 1009-1019.
- [11] Lawler J J, Lewis D J, Nelson E, Plantinga A J, Polasky S, Withey J C, Helmers D P, Martinuzzi S, Pennington D, Radeloff V C. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(20): 7492-7497.
- [12] 魏慧, 赵文武, 张骁, 王新志. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价——以山东省德州市为例. 生态学报, 2017, 37(11): 3830-3839.
- [13] Vigl L E, Tasser E, Schirpke U, Tappeiner U. Using land use/land cover trajectories to uncover ecosystem service patterns across the Alps. *Regional Environmental Change*, 2017, 17(8): 2237-2250.
- [14] Camacho-Valdez V, Ruiz-Luna A, Ghermandi A, Berlanga-Robles C A, Nunes P A L D. Effects of land use changes on the ecosystem service values of coastal wetlands. *Environmental Management*, 2014, 54(4): 852-864.
- [15] Arowolo A O, Deng X Z, Olatunji O A, Obayelu A E. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 597-609.
- [16] 姜忆涓, 李加林, 龚虹波, 叶梦姚, 冯佰香, 何改丽, 黄日鹏. 围填海影响下海岸带生态服务价值损益评估——以宁波杭州湾新区为例. 经济地理, 2017, 37(11): 181-190.
- [17] Li F, Zhang S W, Yang J C, Chang L P, Yang H J, Bu K. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 12-20.
- [18] 吕晓, 史洋洋, 黄贤金, 孙晓芳, 苗志伟. 江苏省土地利用变化的图谱特征. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1077-1084.
- [19] 张国坤, 邓伟, 张洪岩, 宋开山, 李恒达. 新开河流域土地利用格局变化图谱分析. 地理学报, 2010, 65(9): 1111-1120.
- [20] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- [21] 王燕, 高吉喜, 王金生, 郑好. 生态系统服务价值评估方法述评. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2): 337-339.
- [22] 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: 253-260.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 赵江, 沈刚, 严力蛟, 黄璐, 金爱民, 霍思高. 海岛生态系统服务价值评估及其时空变化——以浙江舟山金塘岛为例. 生态学报, 2016, 36(23): 7768-7777.
- [26] 张骞, 高明, 杨乐, 陈成龙, 孙宇, 王金柱. 1988-2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化. 生态学报, 2017, 37(2): 566-575.
- [27] 杨晓明, 戴小杰, 田思泉, 朱国平. 中西太平洋鲑鱼围网渔业资源的热点分析和空间异质性. 生态学报, 2014, 34(13): 3771-3778.
- [28] Bian Z F, Lu Q Q. Ecological effects analysis of land use change in coal mining area based on ecosystem service valuing: a case study in Jiawang. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(6): 1619-1630.
- [29] Wu M, Ren X Y, Che Y, Yang K. A coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value: a case study in Baoshan District, Shanghai, China. *Environmental Management*, 2015, 56(2): 402-419.
- [30] Crouzat E, Mouchet M, Turkelboom F, Byczek C, Meersmans J, Berger F, Verkerk P J, Lavorel S. Assessing bundles of ecosystem services from regional to landscape scale: insights from the French Alps. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(5): 1145-1155.
- [31] 李涛, 甘德欣, 杨知建, 王宽, 齐增湘, 李晖, 陈希. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3787-3796.
- [32] Turner K G, Odgaard M V, Bocher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 89-104.
- [33] 段亚明, 刘勇, 刘秀华, 王红蕾. 基于 POI 大数据的重庆主城区多中心识别. 自然资源学报, 2018, 33(5): 788-800.
- [34] 任平, 洪步庭, 马伟龙, 苑全治, 周介铭. 基于 IBIS 模型的耕地生态价值估算——以成都崇州市为例. 地理研究, 2016, 35(12): 2395-2406.
- [35] Izquierdo A E, Grau H R. Agriculture adjustment, land-use transition and protected areas in Northwestern Argentina. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 858-865.
- [36] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human Domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [37] 宋敏敏, 张青峰, 吴发启, 吴秉校, 吴驳. 黄土沟壑区小流域景观格局演变及生态服务价值响应. 生态学报, 2018, 38(8): 2649-2659.
- [38] 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.
- [39] Tolessa T, Senbeta F, Kidane M. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 47-54.
- [40] 徐雨晴, 周波涛, 於琨, 石英, 徐影. 气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征. 生态学报, 2018, 38(6): 1952-1963.