

郑州市生态系统服务价值时空变化特征

段彦博, 雷雅凯, 马 格, 吴宝军, 田国行

(河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 基于河南省郑州市 2004, 2009, 2014 年 TM(遥感卫星)影像, 分析土地利用变化情况, 并结合郑州市区域特征修正“中国生态系统单位面积生态系统服务价值当量”估算郑州市生态系统服务价值, 分析研究期间时序变化与空间分异特征, 探究了郑州生态系统服务价值与不同土地利用类型变化之间的相关关系。结果显示: 在 2004-2014 年间, 郑州市的生态系统服务价值总量逐步上升, 由 103.31×10^8 增加到 125.69×10^8 元 $\cdot a^{-1}$, 年均增长率为 2.0%。原因是林地面积增长, 带动原材料生产、美学景观、气体调节的生态系统服务价值显著增加; 新密市、登封市生态系统服务价值变动剧烈, 区域间存在明显差异。郑州市生态系统服务价值在时间序列上变化较为剧烈, 区域间分布不均衡, 呈现明显的西高东低、南高北低分布形态。研究区生态系统服务价值与林地面积呈显著正相关, 相关系数为 0.855, 与其他地类无显著线性关系。林地面积的增长是带动区域生态系统服务价值提升的根源。图 2 表 6 参 24

关键词: 景观生态学; 生态系统服务价值; 土地利用; 时空分异; 郑州

中图分类号: S7-98; F062.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2017)03-0511-09

Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Zhengzhou

DUAN Yanbo, LEI Yakai, MA Ge, WU Baojun, TIAN Guohang

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: Based on TM image data in the years of 2004, 2009 and 2014 in Zhengzhou, the research analyzed the land use/cover changes, estimated the ecosystem service value (ESV) of the survey area according to the “equivalent value per unit area of ecosystem services in China”, analyzed its spatio-temporal characteristics, examined the correlation between the ESV evolution and the land use changes. The results showed that due to the substantial growth of forest land area, the ESV was increased from 103.31×10^8 to 125.69×10^8 yuan per year between 2004 and 2014, and the average annual growth rate was 2.0 per cent. The growth of forest land area had caused significant increase in the ESV of the raw materials, aesthetic landscape and climate regulation. Furthermore, the ESV changes showed obvious regional differences, which were most significant in Xinmi and Dengfeng. Results showed the temporal change of ESV in Zhengzhou was dramatic, and the regional change was asymmetric, which indicated a “west high, east low” and “south high, north low” pattern. The ESV of the survey area had significant positive correlation with the area of forest land, and the correlation coefficient was 0.855, while there was no significant linear correlation with other types of land area. The forest land area growth is the source of increasing regional ecosystem service value. [Ch, 2 fig. 6 tab. 24 ref.]

Key words: landscape ecology; ecosystem service value (ESV); land use; spatio-temporal differentiation; Zhengzhou

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401206, 31600579); 河南省科技攻关项目(162102310093); 河南农业大学博士科研启动基金项目(30600407); 河南省高速公路高效节约绿色景观构建关键技术研究项目(2013J49); 河南省高速公路景观的稳定性和可持续性研究项目(2014Z06)

作者简介: 段彦博, 从事风景园林规划设计与土地生态研究。E-mail: 835269656@qq.com。通信作者: 田国行, 教授, 博士, 从事风景园林规划设计与城市绿地资源建设与管控。E-mail: tgh-6408@163.com

生态系统服务是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务并从中获得利益^[1-3]。土地利用/覆盖变化(land use/cover changes, LUCC)是人类活动与自然生态系统互相影响的综合表现,这一过程不仅引起地表结构的巨大变化,而且极大影响了区域的气候、水文资源、土壤及生物多样性,最终影响整个生态系统的结构和功能^[4]。近年来,随着城市化进程的加速,土地利用类型由自然主导(森林、草地、湿地)快速转变为由人类主导(建设用地),导致区域生态系统服务价值呈现剧烈和复杂的时空变化特征,对全球环境造成巨大破坏^[5]。因此,基于生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)法对 LUCC 的生态环境效应进行货币形式的定量评估,有利于缓解国民生产总值(gross domestic product, GDP)增长与生态系统维护之间的矛盾,为地区土地利用筹划与决策制定以及生态环境建设提供科学的理论依据^[6-7]。ESV 空间分异及其与 LUCC 的相关关系已成为当今研究热点。COSTANZA 等^[3]开创了生态系统服务价值探究的里程碑,建立了生态系统服务价值系数以货币形式全面估算全球生态系统服务价值,考虑到不同类型生态系统空间时间的特异性,谢高地等^[8-9]基于 COSTANZA 等的研究结合国情建立了“中国生态系统单位面积生态系统服务价值当量”表,国内由此逐步开始了生态系统服务价值的相关研究。现今研究多集中在土地利用变化率、土地利用程度分析,以及相关分析与多元回归分析、敏感度分析、马尔科夫模型、灰色系统模型、InVEST 模型分析上,以研究生态系统服务价值时间异质性为主^[10-13]。本研究参考国内外相关领域研究方法,基于前人研究结论的基础,利用修正后的生态系统服务价值当量表对郑州市 ESV 进行估算,弥补了常规评估方法定量难,数据利用间接的缺陷,增加了因土地利用变化导致的 ESV 空间分异的探究,建立土地利用变化与 ESV 相关关系的研究;通过遥感影像技术(thematic mapper, TM)提取分析郑州市 2004, 2009, 2014 年土地利用状况,采用时空分析和相关分析,探究郑州市 10 a 间 ESV 时空变化特征与 LUCC 的相关变化关系,以期遏制生态环境恶化与土地利用规划提供量化依据,推动地域间可持续统筹发展。

1 研究概况与研究方法

1.1 研究区概况

郑州(34°16′~34°58′N, 112°42′~114°14′E)属暖温带半干旱大陆性气候,地处中原腹地,北临黄河,西依嵩山,南部有始祖文化发源地,东为黄淮大平原,山水相依,自然文化资源丰富,河流水系众多,有“九州之中,十省通衢”之称;郑州市域总面积 7 446.2 km²,现辖 6 区 5 市 1 县:金水区、二七区、中原区、管城区、惠济区、上街区、郑东新区、巩义市、登封市、荥阳市、新密市、新郑市、中牟县。

1.2 数据来源与处理

采用 2004 年、2009 年、2014 年分辨率为 30 m 的郑州市 Landsat TM 影像,以 1:50 000 地形图参考,运用 ENVI 5.1 对郑州市不同时期的 Landsat TM 影像进行图像的镶嵌、裁剪、几何纠正和地形校正等预处理,通过掩膜提取得到覆盖研究区的 3 期影像。参照 GB/T 21010-2007《土地利用现状分类标准》,结合研究区域自然条件和土地利用分类体系,将郑州市土地根据利用类型分为耕地、林地、水域、建设用地和未利用地 5 种。运用 ENVI 5.1 基于先验知识建立训练样本,对处理后的遥感影像进行监督分类,结合谷歌影像以及野外调查数据对解译结果进行人工修改,得到研究区 3 期土地利用分类数据。通过随机选点来验证数据的解译精度。野外全球定位系统(global positioning system, GPS)调查数据表明,总体分类精度为 85.6%~88.9%,满足研究需求。为了使生态系统服务价值的评价尺度具有可比性,将郑州市划分为郑州市辖区(下称城区)、新密市、新郑市、巩义市、登封市、荥阳市、中牟县等 7 个评价单元,基于 ArcGIS 10.0 统计时序变化下郑州市各评价单元土地利用类型的面积,并建立数据库。此外,本研究还搜集了研究区行政分布图和《郑州市统计年鉴》等相关基础资料。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析 土地利用动态变化。土地利用动态变化可用来表示土地流转的速度,分为单一土地利用动态度和综合土地利用动态度。单一土地利用动态度(K_L)计算公式为^[5-7]:

$$K_L = (U_a - U_b) / U_a T \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: U_a 指研究初期某种利用类型土地面积; U_b 指研究末期某种利用类型土地面积; T 为研究周期(a)。综合土地利用动态度(R_z)计算公式为:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中： U_i 为研究初期第*i*类土地类型面积； ΔU_{i-j} 指研究期间内第*i*类土地转为非*i*类土地类型面积的绝对值； T 为研究时长。土地利用程度综合指数。根据庄大方等^[14]的分级方法并结合郑州市情况，使用该指标衡量土地利用的深度及广度。计算公式为：

$$D = \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \times 100 \quad (3)$$

式(3)中： A_i 指研究区内土地利用程度分级指数，未利用地为1级，林地、水域为2级，耕地为3级，建设用为4级； C_i 指*i*级土地与研究区面积的比值； n 为土地利用程度分级数； $D > 0$ 时表示研究区土地利用程度正处在发展阶段，否则处于衰退或调整阶段^[5-7]。

1.3.2 生态系统服务价值计算 谢高地等^[8-9]根据 COSTANZA 的研究，制定了“中国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表”，其中农田的当量为1，规定农田的生态系统服务价值当量因子的经济价值等于当年全国平均粮食单产市场价值的1/7。本研究在此基础上，结合研究区单位面积农田每年自然粮食产量的经济价值进行修订。方法如下：

$$E_1 = Q_1 \times F_1 / 7; \quad (4)$$

$$E_x = a_x / a_1 \times E_1 \quad (5)$$

式(4)和式(5)中： Q_1 为研究区2004–2014年粮食产量均值4 518 kg·hm⁻²， F_1 为2008年全国粮食平均收购价格1.69元·kg⁻¹。由此估算出研究区农田单位面积生态系统服务价值当量的价值 E_1 为1 090.77元^[15-16]。 E_x 为第*x*类土地利用类型单位面积生态系统服务价值当量的价值， a_1 为农田的当量， a_x 代表除农田以外其他5类生态系统当量($x=2, 3, \dots, 6$)，依次对应森林、草地、湿地、河流/湖泊、荒地。由于林地与森林环境相似，耕地与农田环境相似，城市未利用地与荒漠环境相似，因此将林地、耕地、未利用地分别对应森林、农田、荒漠的价值系数，并假定建设用地的价值系数为0，由式(4)和式(5)求出郑州市不同土地利用类型生态系统服务价值系数(元·hm⁻²，表1)^[16-17]。计算郑州市各时期土地生态系统服务价值：

$$V_{ES} = \sum_{i=1}^n A_k \times C_k; \quad (6)$$

$$V_{ESf} = \sum_{i=1}^n A_k \times C_{fk} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中： V_{ES} 指生态系统服务价值； A_k 指研究区第*k*种土地利用类型的面积； C_k 指第*k*种土地利用类型的生态系统服务价值系数； V_{ESf} 指单项(*f*项)生态系统服务价值； C_{fk} 指第*k*类土地利用类型的第*f*项生态系统服务价值系数^[18-19]。

表 1 郑州市生态系统服务价值系数

Table 1 Coefficients of the ESV in Zhengzhou from 2004 to 2014

生态系统服务	生态系统服务价值系数/(元·hm ⁻²)				
	耕地	林地	建设用地	水域	未利用地
食物生产	1 090.77	359.95	0	578.11	21.82
原材料生产	425.40	3 250.49	0	381.77	43.63
气体调节	785.35	4 712.13	0	556.30	65.45
气候调节	1 058.05	4 439.43	0	2 246.99	141.80
水文调节	839.89	4 461.25	0	20 473.75	76.35
废物处理	1 516.17	1 876.12	0	16 197.93	283.60
土壤保持	1 603.43	4 384.90	0	447.22	185.43
维持生物多样性	1 112.59	4 919.37	0	3 741.34	436.31
提供美学景观	185.43	2 268.80	0	4 843.02	261.78
合计	8 617.08	30 672.44	0	49 466.43	1 516.17

1.3.3 生态系统服务价值变异系数 变异系数可以度量郑州市域不同时间序列的生态系统服务价值的空间离散程度, 以及不同地区生态系统服务价值时间上的离散程度。计算公式为:

$$V_c = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中: V_c 为变异系数; n 为样本数; K_i 为样本分值; $\bar{K}$ 为样本分值平均值^[20-22]。

1.3.4 相关性分析 相关分析可以定量描述 2 个变量之间的线性相关程度, 明确 2 个变量之间的相关方向。采用 Pearson 简单相关系数^[21], 以郑州市生态系统服务价值、不同土地利用类型在时空尺度的变异系数为变量, 定量描述郑州市生态系统服务价值与各类用地变化之间的相关关系。其计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式(9)中: R_{xy} 为相关系数; n 为样本数; x_i, y_i 分别是 x, y 的第 i 个值; $\bar{x}, \bar{y}$ 分别是 x, y 的平均值^[23]。

2 结果与分析

2.1 郑州市土地利用变化分析

2.1.1 土地利用变动分析 由式(6)和式(7)求出郑州市各时期土地生态系统服务价值如表 2。2004–2014 年间, 耕地和林地始终是研究区主要用地结构, 两者面积和占研究区总面积的 70% 以上; 林地面积不断增长, 总用地类型面积比率由 2004 年的 22.05% 增加到 40.56%, 成为第一大土地利用类型; 耕地面积不断减少, 比例由 62.36% 下降到 34.4%, 退居第二大土地利用类型; 建设用地面积快速增长; 水域面积和未利用地面积在 2004–2014 年间都呈现先增后减的趋势。研究区总体变化呈现 “三增两减” 趋势, 受退耕还林、乡村旅游、城市扩张等因素影响, 耕地向林地、建设用地流转。

表 2 郑州市 2004–2014 土地利用变化特征

Table 2 Land use changes of Zhengzhou City in 2004 to 2014

土地利用 类型	2004		2009		2014		变化幅度/hm ²		
	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%	2004–2009	2009–2014	2004–2014
耕地	471 859.31	62.36	340 574.12	45.01	259 583.25	34.30	–131 285.19	–80 990.87	–212 276.06
林地	166 858.00	22.05	260 662.37	34.45	306 939.28	40.56	93 804.37	46 276.91	140 081.28
建设用地	91 095.21	12.04	120 148.28	15.88	166 262.33	21.97	29 053.07	46 114.05	75 167.12
水域	23 055.16	3.05	26 643.83	3.52	18 361.88	2.40	3 588.67	–8 281.95	–4 693.28
未利用地	3 824.57	0.51	8 663.65	1.14	5 545.51	0.73	4 839.08	–3 118.14	1 720.94

2.1.2 土地利用动态度及利用程度指标分析 根据式(1)式(2)和式(3)求出相关指数如表 3。对比 2004–2009 与 2009–2014 各类用地单一动态度, 耕地、林地、建设用地单一动态度变动较为平稳, 水域、未利用地单一动态度变化较大, 在 2004–2009 呈现增长趋势, 而 2009–2014 急转而下呈现减小趋势。2004–2014 年间综合动态度有逐渐衰减的态势。2004–2009 年末利用地、林地的单一动态度较高, 2009–2014 年建设用地、未利用地的单一动态度较高, 说明这些土地流转较快, 林地单一动态度为各种用地类型最小, 归因于 2009–2014 年间城市中心快速发展, 耕地、建设用地、未利用地、水域相互流转, 而林地主要集中在城市郊区变动速率较为缓慢。由表 3 可知: 在 2004–2014 年间研究区 2004, 2009 和 2014 年土地利用程度综合指数总计均大于 270, 表明郑州市土地正在快速流转, 2014 年除耕地、水域、未利用地土地利用程度较 2004 年下降, 处于衰退期, 但总体上土地利用程度较高。比较各类土地可知, 2004–2014 年间耕地利用综合指数下降明显, 2009–2014 年间水域、未利用地利用程度降低进入衰退期。

2.2 郑州市生态系统服务价值的时序变化

根据式(8)求出研究区生态系统服务价值变异系数如表 4。在 2004–2014 年, 7 个评价单元中只有郑州市辖区的生态系统服务价值减少, 其他 6 个区域均为增长。2004–2009 年期间, 7 个评价单元的生态

表 3 土地利用动态度及程度综合指数

Table 3 Single land use dynamics and integrated land use dynamics

项目	年度	土地利用类型					合计
		耕地	林地	建设用地	水域	未利用地	
单一动态度/%	2004–2009	–5.56	11.24	6.38	3.11	25.31	
	2009–2014	–4.76	3.55	7.68	–6.22	–7.20	
	2004–2014	–4.50	8.40	8.25	–2.04	4.50	
综合动态度/%	2004–2009	25.80					
	2009–2014	14.70					
	2004–2014	11.46					
土地利用程度	2004	187.07	44.10	48.15	6.09	0.51	285.92
	2009	135.02	68.90	63.51	7.04	1.14	275.61
	2014	102.91	81.13	87.89	4.85	0.13	276.91

系统服务价值均有增长，其中中牟县、新郑市增长最为明显，年增长率分别为 6.2%和 5.5%。2009–2014 年间除城区、中牟县、新郑市服务价值衰减，其他区域生态系统服务价值均表现出连续增长的态势。总体上看郑州市生态系统服务价值在时间序列上变化较为剧烈，变异系数达到 10.3%。7 个评价单元中生态系统服务价值时序变化存在差异，其中新密市、登封市的生态系统服务价值在研究期间变化最为剧烈，变异系数分别为 23.2%和 17.8%；巩义市、郑州市辖区生态系统服务价值在时间序列上变动较平稳，变异系数分别为 6.7%和 6.5%。

表 4 各研究区 2004–2014 年生态系统服务价值

Table 4 ESV in each area between 2004–2014

评价单元	ESV/亿元			地均 ESV/(万元·hm ^{–2})			年变化率/%			变异系数/%
	2004	2009	2014	2004	2009	2014	2004–2009	2009–2014	2004–2014	
郑州市	103.31	122.60	125.69	1.37	1.62	1.66	3.5	0.5	2.0	10.3
城区	11.98	12.67	11.13	1.15	1.21	1.07	1.1	–2.6	–0.7	6.5
中牟县	17.26	23.35	18.51	1.21	1.63	1.30	6.2	–4.5	0.7	16.3
巩义市	18.04	18.43	20.42	1.76	1.79	1.99	0.4	2.1	1.2	6.7
荥阳市	13.37	14.10	15.38	1.38	1.45	1.58	1.1	1.8	1.4	7.1
新密市	14.41	18.01	22.95	1.44	1.81	2.30	4.6	5.0	4.8	23.2
新郑市	9.62	12.58	10.55	1.09	1.42	1.19	5.5	–3.5	0.9	13.9
登封市	18.63	23.46	26.75	1.53	1.93	2.20	4.7	2.7	3.7	17.8

从表 5 看出：不同用地类型对生态系统服务功能的贡献也各不相同，林地、耕地这 2 类用地提供了郑州市 88%以上的生态系统服务价值。2004–2009 年间除耕地生态系统服务价值呈现下降态势以外，其他用地类型均呈增长态势，且未利用地增长最为迅速，年平均增长率达到 16.7%。2009–2014 年间水域、未利用地的生态系统服务价值显示减小，且耕地以更快的速率不断减少；虽然本研究中规定建设用地服务价值为 0，其在总体价值上无增无减，但是由于建设用地不断扩张，侵占林地、水域等生态用地，直接致使林地、水域等生态用地的生态系统服务价值的锐减；与此相反，在 2006 年城市绿地系统

表 5 郑州市 2004–2014 年不同地类的生态系统服务价值

Table 5 ESV of different land types in Zhengzhou from 2004 to 2014

土地利用类型	生态系统服务价值/亿元			百分比/%			年变化率/%			变异系数/%
	2004	2009	2014	2004	2009	2014	2004–2009	2009–2014	2004–2014	
耕地	40.66	29.35	22.37	39.36	23.94	17.8	–6.3	–5.3	–5.8	30.0
林地	51.18	79.95	94.15	49.55	65.21	74.91	9.3	3.3	6.3	29.2
建设用地	0	0	0							
水域	11.40	13.18	9.08	11.04	10.75	7.22	2.9	–7.2	–2.2	18.3
未利用地	0.06	0.13	0.08	0.06	0.11	0.06	16.7	–9.3	2.9	40.1

规划、2008 年林业生态城市建设、2011 年郑州市区森林公园体系建设以及 2012 年郑州新型城镇化建设提出的“两环十七放射生态廊道建设”等相关政策带动下,郑州市林地大幅度增长,弥补了建设用地增多,耕地、水域等生态用地减少带来的负面影响,使研究区生态系统服务价值保持稳步上升的趋势。

从不同类型生态服务产生的价值来看(表 6),郑州市水文调节服务价值占比居于领先地位,占总价值的 15%以上,但是水文调节绝对价值由 2004–2009 年的增长趋势转变为 2009–2014 年的减小趋势,可能是由于郑州市水域面积下降了 8 281.95 hm²,黄河流域水位下降转化为滩涂、裸地等未利用地,用地类型改变了,但其水源涵养功能尚存,从而保障了水文调节服务的稳定。从年变化率来看,除食品生产、废物处理服务价值显示出降低态势,其余各类型服务价值均呈现增大态势,其中原材料生产服务价值、提供美学景观服务价值、气体调节服务价值增长最为显著,为郑州市服务总值的提高给予支持。

表 6 郑州市 2004–2014 年不同类型生态系统服务价值

Table 6 ESV of different service functions in Zhengzhou from 2004 to 2014

生态系统服务类型	生态系统服务价值/亿元			贡献率/%			年变化率/%			变异系数/ %
	2004	2009	2014	2004	2009	2014	2004–2009	2009–2014	2004–2014	
食物生产	5.88	4.81	4.04	5.69	3.92	3.21	–3.9	–3.4	–3.7	18.8
原材料生产	7.52	10.03	11.15	7.28	8.18	8.87	5.9	2.1	4.0	19.4
气体调节	11.70	15.11	16.61	11.33	12.32	13.22	5.2	1.9	3.6	17.4
气候调节	12.92	15.79	16.79	12.51	12.88	13.36	4.1	1.2	2.7	13.2
水文调节	16.13	19.95	19.64	15.61	16.27	15.63	4.3	–0.3	2.0	11.4
废物处理	14.03	14.39	12.68	13.58	11.74	10.01	0.5	–2.5	–1.0	6.6
土壤保持	14.99	17.03	17.71	14.51	13.89	14.09	2.6	0.8	1.7	8.5
维持生物多样性	14.34	17.65	18.70	13.88	14.39	14.88	4.2	1.2	2.7	13.5
提供美学景观	5.79	7.86	8.35	5.60	6.41	6.64	6.3	1.2	3.7	18.5

2.3 郑州市生态系统服务价值的空间分异

本研究以各评价单元地均生态系统服务价值(表 4)为依据,采用 Arc GIS 中的自然间断点分级法(Jenks)划分郑州市 2004–2014 年生态系统服务价值为 5 个等级(图 1),各个评价单元颜色从浅到深依次代表服务价值状态:低、较低、一般、较高、高,以各个评价单元的生态系统服务价值等级均值代表 2004–2014 年郑州市总体水平。由图 1 可知:2004–2014 年间总体上城区、新郑市的生态系统服务价值一直处于较低等级,巩义市、登封市的生态系统服务价值一直处于较高等级,就位于不同生态系统服务价值等级的市(县)数量来看,处于较高和较低水平的最多,占评价单元总量的 70%以上,中等水平的的评价单元数量不超过 2 个。在 2004 年位于较低生态系统服务价值等级的分别是:城区、新郑市、中牟县;位于中等生态系统服务价值等的级分别是:荥阳市、新密市;巩义市、登封市则处于低生态系统服务价值等级;至 2009 年荥阳市生态系统服务功能恶化使生态系统服务价值降低,由中等进入低值范围,相反新密市生态系统服务功能提高,其生态系统服务价值等级由中等变为较高;2014 年中牟县生态系统服务价值等级由中等降为较低,而荥阳市则较之前提高,处于中等级别。从空间分布来看,生态系统服务价值呈现明显的西高东低分布形态,这是由于西部高值区域森林资源较为丰富,单位面积绿量较高,林地面积所占总用地类型面积较高基本上达到 40%以上,其中新密市林地面积在总面积的 70%以上,为生态系统提供了更丰富的生态服务;相反东部低值区域的黄淮平原,主要以耕地为土地利用类型,森林覆盖率较低,且黄河的水资源并没有为东部地区生态系统的改善提供支持,从而导致东部地区的服务价值多年没有增长迹象。由此说明:郑州市整体服务价值空间变异特征与地势地形地貌密切相关。

由图 1 同时可知:郑州市北部生态优势逐年弱化,生态重心逐步向南转移;南部巩义市的生态系统服务价值逐年减小,到 2014 年生态系统服务价值等级地位被新密市所取代,与登封市形成组团成为研究区生态系统服务价值最优区域,并且以城区为中心呈现由“低—高”的逐渐增强的布局形式。以郑州市各年度生态系统服务价值在各评价单元的变异程度可以看出,2004–2014 年间郑州市生态系统服务价值在各地区间分布越来越不均衡,其中新密市、登封市、中牟县的生态系统服务价值的时序离散程度较高,分别为 23.2%,17.8%,16.3%,也是造成研究区生态系统服务价值空间分异较大的原因。

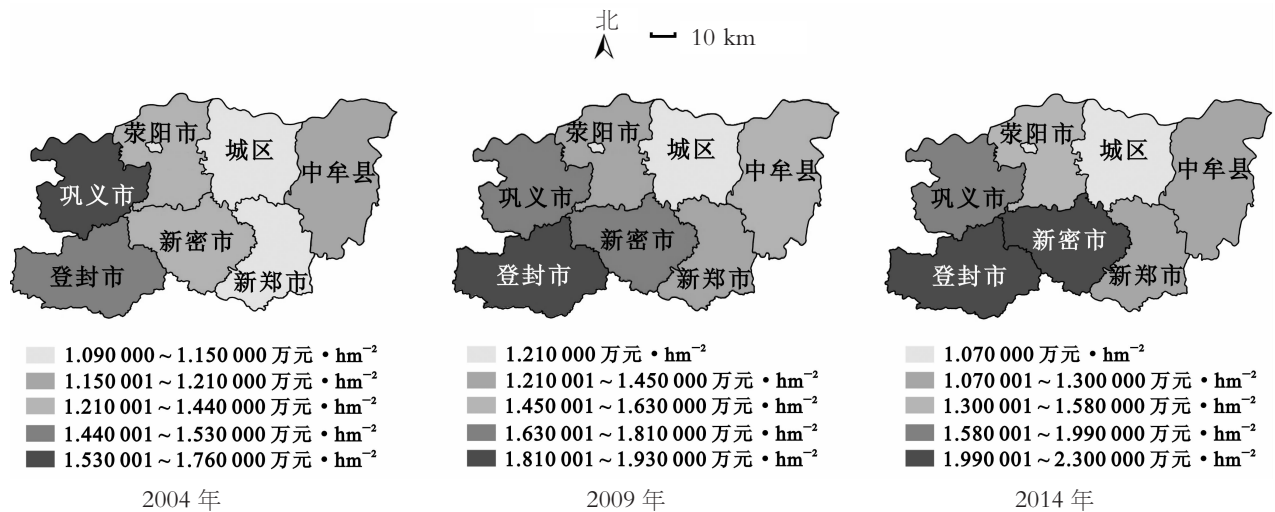


图 1 郑州市 2004–2014 年生态系统服务价值的空间分异
Figure 1 Spatial differences of the ESV in Zhengzhou from 2004 to 2014

2.4 生态系统服务价值与土地利用变化的相关关系

对研究区的各类土地利用类型的生态系统服务价值时序离散程度进行分析发现(图 2)，水域、未利用地的生态系统服务价值离散程度变动较为显著，其他土地利用类型的生态系统服务价值也呈现不同程度的波动。未利用地生态系统服务价值的剧烈变动主要源于城市化建设过程中存在大量的施工现场以及黄河水位下降滩涂地增多；水域生态系统服务价值变动剧烈主要由于研究区东北部的大量鱼塘的消失，以及研究区范围内黄河水域面积的减少。以研究区各评价单元生态系统服务价值的变化的离散程度和各类型土地利用面积的变异系数为变量，采取 Pearson 相关系数由式(9)计算两者的相关关系。结果表明：研究区生态系统服务价值与林地面积在 0.05 水平显著相关，相关系数为 0.855；而其他地类面积与生态系统服务价值并无显著线性相关关系。这表明林地面积的增长是带动整个研究区生态系统服务价值提升的根源所在。

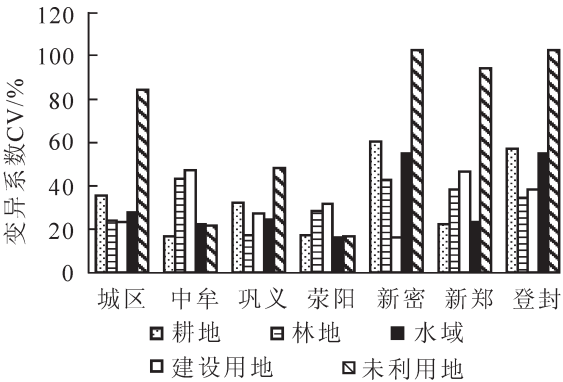


图 2 郑州市 2004–2014 年各地区生态系统服务价值与用地变化的离散程度
Figure 2 Dispersion levels of the ESV and LUC in each district of Zhengzhou from 2004 to 2014

3 结论与讨论

研究区在研究期间始终处在发展阶段，整体上土地利用程度较高，覆土结构变动较大，呈现耕地、水域面积减少，林地、建设用地、未利用地面积增加的“三增两减趋势”。其中林地面积增长，带动原材料生产、美学景观、气体调节的 ESV 显著增加，而建设用地的增加带来了 ESV 的亏损。郑州市生态系统服务价值在时间序列上变动较为剧烈，除城区呈下降态势，其余地区均呈现增加趋势；从生态系统服务价值空间分异来看，随着郑州市生态系统服务价值的不断提升，生态系统服务价值呈现明显的西高东低，南高北低的分布形态。为缩小区域间的差异，应在西部山区丘陵区提升林业内涵质量，调整林种树种结构，提高林地单位面积的绿量；在中心区域加大建设用地管控力度，调控政策限制该类型用地不断扩张；在东部平原应加强造林工作以及水资源的生态恢复与治理。郑州市 2004–2014 年生态系统服务价值与林地面积呈显著正相关，相关系数为 0.855，与其他地类面积并无显著线性关系，强调了林地面积的增长是带动区域生态系统服务价值提升的根源。

由于生态过程的复杂性、异质性、尺度多样性，以及生态系统服务价值评估体系的不完善性和评价方法的不统一性，不同的生态系统间的服务价值可比性较弱。胡金龙等^[22]、钟媛等^[5]、曾杰等^[23]以同样

的评估方法分别对桂林市、西安市、武汉城市圈进行生态系统服务价值估算,较本研究生态系统服务价值估算结果偏高。这是由于在对生态系统服务价值当量进行修正时方法不同以及研究地域特征本身也存在差异。本研究采用统一的生态系统服务价值当量对研究区的生态系统服务价值进行时间和空间上的分析,评估结果并不会对时空分析产生影响;但是后续可加强生态系统服务价值评估体系的规范性,以及计算方法的科学性、准确性^[24]。

采用变异系数对研究区生态系统服务价值时间、空间上的离散程度进行分析,能够反映出研究区生态系统服务价值时空分异特征,但无法对不同尺度下的局部特征进行描述。生态过程的复杂性以及尺度的多样性并不能简单以数值估计。今后需要更深入探究尺度变化下的不同区域、整体与局部的生态系统服务价值,创建定量估算方法及模型,以生态过程为出发点探究局部生态系统服务价值时空分异特征。

4 参考文献

- [1] WESTMAN W E. How much are nature's services worth? [J]. *Science*, 1977, **197**(4370): 960 – 964.
- [2] DAILY G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystem* [M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [3] COSTANZA R, d'ARCE R, de GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*. 1997, **387**(6630): 253 – 260.
- [4] 刘吉平, 赵丹丹, 田学智, 等. 1954–2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, **34**(12): 3234 – 3244.
LIU Jiping, ZHAO Dandan, TIAN Xuezhi, *et al.* Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in the San-jiang Plain from 1954 to 2010 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(12): 3234 – 3244.
- [5] 钟媛, 赵敏娟. 城市土地利用变化对生态系统服务的影响: 以西安市为例[J]. *水土保持研究*, 2015, **22**(1): 274 – 279.
ZHONG Yuan, ZHAO Minjuan. Effect of land use change on ecosystem service value: a case study of Xi'an City [J]. *Res Soil Water Conserv*. 2015, **22**(1): 274 – 279.
- [6] 潘影, 张茜, 甄霖, 等. 北京市平原区不同圈层绿色空间格局及生态服务变化[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(4): 818 – 823.
PAN Ying, ZHANG Qian, ZHEN Lin, *et al.* Green space pattern and ecosystem services value of the sub-regions in Beijing plain area [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(4): 818 – 823.
- [7] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 2014, **69**(1): 54 – 63.
WU Linna, YANG Shengtian, LIU Xiaoyan, *et al.* Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976 [J]. *Acta Geogr Sin*, 2014, **69**(1): 54 – 63.
- [8] 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.
XIE Gaudi, LU Chunxia, LENG Yunfa, *et al.* Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. *J Nat Resour*, 2003, **18**(2): 189 – 196.
- [9] 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): 911 – 919.
XIE Gaudi, ZHEN Lin, LU Chunxia, *et al.* Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *J Nat Resour*, 2008, **23**(5): 911 – 919.
- [10] 邓伟, 杨华, 崔艳君. 重庆主城区近 30 年土地利用变化的生态环境效应评价[J]. *水土保持研究*, 2010, **17**(3): 232 – 236.
DENG Wei, YANG Hua, CUI Yanjun. Assessment of ecological environment effects on landuse change in Chongqing City nearly 30 years [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2010, **17**(3): 232 – 236.
- [11] 邵俊明, 周宝同, 徐中强, 等. 基于 Morzn's I 和 Kriging 插值在不同采样尺度下的土地利用程度分析: 以重庆市石柱县为例[J]. *四川农业大学学报*, 2015, **33**(2): 215 – 222.
SHAO Junming, ZHOU Baotong, XU Zhongqiang, *et al.* Analysis of land use utilization degree under different sampling scales based on Morans I and Kriging interpolation: in the case of Shizhu County of Chongqing municipality [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2015, **33**(2): 215 – 222.

- [12] 顿耀龙, 王军, 郭义强, 等. 基于 AHP-FCE 模型的大安市土地整理可持续性评价[J]. 中国土地科学, 2014, **28**(8): 57 – 64.
DUN Yaolong, WANG Jun, GUO Yiqiang, *et al.* Sustainability evaluation of land consolidation of Da'an City based on AHP-FCE model [J]. *China Land Sci*, 2014, **28**(8): 57 – 64.
- [13] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例[J]. 地理研究, 2013, **32**(8): 1497 – 1507.
QIAO Weifeng, SHENG Yehua, FANG Bin, *et al.* Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: a case study of Suzhou, Jiangsu Province [J]. *Geogr Res*, 2013, **32**(8): 1497 – 1507.
- [14] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, **12**(2): 105 – 111.
ZHUANG Dafang, LIU Jiyuan. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China [J]. *J Nat Resour*, 1997, **12**(2): 105 – 111.
- [15] 胡瑞法, 冷燕. 中国主要粮食作物的投入与产出研究[J]. 农业技术经济, 2006, **3**(1): 2 – 7.
HU Ruifa, LENG Yan. Research on input and output of main grain crops in China [J]. *J Agrotech Econ*, 2006, **3**(1): 2 – 7.
- [16] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, **17**(4): 55 – 60.
SUN Xinzhang, ZHOU Hailin, XIE Gaodi. Ecological services and their values of Chinese agroecosystem [J]. *China Popul Resour & Environ*, 2007, **17**(4): 55 – 60.
- [17] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报, 2004, **19**(4): 480 – 491.
ZHAO Tongqian, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, *et al.* Forest ecosystem services and their valuation in China [J]. *J Nat Resour*, 2004, **19**(4): 480 – 491.
- [18] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报, 2004, **24**(6): 1101 – 1110.
ZHAO Tongqian, OUYANG Zhiyun, JIA Liangqing, *et al.* Ecosystem services and their valuation of China grassland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(6): 1101 – 1110.
- [19] 张玮, 李玉凤, 高鸿, 等. 基于土地转移矩阵的生态服务功能研究: 以南京市仙林新市区为例 [J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(6): 800 – 805.
ZHANG Yi, LI Yufeng, GAO Hong, *et al.* Eco-service functions based on land transfer matrix: a case study of Xianlin, a new urban area in Nanjing [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2014, **30**(6): 800 – 805.
- [20] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件: 兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005(3): 65 – 69.
LIN Haiming, ZHANG Wenlin. The relationship between principal component analysis and factor analysis and spass software & to discuss with comrade LIU Yumei, LU Wendai, *et al.* [J]. *Stat Res*, 2005(3): 65 – 69.
- [21] 赵永翔, 孙亚芳, 高庆. 分析常用 7 种统计分布的统一线性回归方法[J]. 机械强度, 2001, **23**(1): 102 – 106.
ZHAO Yongxiang, SUN Yafang, GAO Qing. Unified liner regression method for the analysis of seven commonly used statistical distrivutions [J]. *J Mech Strenght*, 2001, **23**(1): 102 – 106.
- [22] 胡金龙, 王金叶, 周志翔, 等. 桂林市区土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(10): 89 – 93.
HU Jinlong, WANG Jinye, ZHOU Zhixiang, *et al.* Effects of land use changes on ecosystem service values in urban area of Guilin City [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2012, **32**(10): 89 – 93.
- [23] 曾杰, 李江凤, 姚小微. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 883 – 891.
ZENG Jie, LI Jiangfeng, YAO Xiaowei. Spatio-temporal dynamics of ecosystem serves value in Wuhan urban agglomeration [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(3): 883 – 891.
- [24] KREMEN C. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? [J]. *Ecol lett*, 2005, **8**(5): 468 – 479.