

LUCC 影响下湖南省生态系统服务价值时空演变*¹

熊鹰^{1, 2} 张方明^{1, 2} 龚长安³ 罗朋¹

(1. 长沙理工大学建筑学院, 湖南长沙 410114;

2. 长沙理工大学资源环境与城乡规划研究中心, 湖南长沙 410114;

3. 湖南省经济地理研究所, 湖南长沙 410004)

【摘要】:基于土地利用/覆被变化(LUCC)遥感解译数据,利用生态系统服务价值评估模型及GIS空间统计方法,探讨了湖南省1990~2015年间生态系统服务价值(ESV)时空格局及其动态演化。结果表明:湖南省生态系统服务价值总体呈下降趋势,其中减少最明显的是耕地、林地和草地系统价值。生态系统服务价值空间格局的等级差异明显,ESV高值区与低值区相互溶解渗透,总体上高值区与较高值区对低值区呈包围态势。高值和较高值区分布较均匀、低值与较低值区分布较集中,中等值区分布较为散乱,呈随机镶嵌结构分布格局。生态系统服务价值及其动态演化的空间自相关与高低值聚集现象明显,但其相关性聚集程度趋于弱化。“退田还湖”、“退耕还林”、“绿色湖南”等政策的实施,促使研究区域的ESV增加并形成若干增值热点区,城镇化、城市扩张与土地开发导致生态系统服务价值损失,并形成城镇密集区、水土资源富集区分布的价值损失冷点区。

【关键词】:土地利用/覆被变化(LUCC);生态系统服务价值(ESV);空间格局;时空演变;湖南省

【中图分类号】:F301.24;P951 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)06-1397-12

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201806024

生态系统服务是指生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的基础、环境条件与效用^[1, 2],以满足人类生存、健康、福祉等多种需求,对人类物质和精神条件供给、区域和全球生态安全以及生命支持系统维持至关重要^[3, 4]。土地是各种生态系统的载体,人类在土地上的经营活动对地表的土地覆盖状况产生了巨大的改变,驱动着生态系统服务提供能力的变化。土地利用/覆盖变化(Land Use And Land Cover Change, LUCC)通过改变生态系统的结构和功能,对生态系统维持其服务功能起决定性作用^[5]。研究土地利用/覆被变化下区域生态系统服务价值(Ecosystem Service Values, ESV)的变化,对于了解土地利用变化的生态环境效应,促进区域经济与环境的协调发展具有重要意义。

¹ 收稿日期:2017-12-04; 修回日期:2018-02-05

基金项目:教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(16JZD013);国家社会科学基金项目(15BJY051);湖南省自然科学基金项目(2017JJ2264);湖南省社会科学基金项目(16ZDB04);湖南省社会科学成果评审委员会课题(XSP18ZDI031);长沙理工大学土木工程重点学科创新性项目(17ZDXK02)

作者简介:熊鹰(1977~),男,博士,教授,主要从事景观生态、城乡土地利用等方面的研究。E-mail:csustxy@126.com

20 世纪 90 年代初生态系统服务功能价值化问题开始引起国际学术界高度关注。Costanza 等在 Nature 上发表的有关学术论文^[4]以及由联合国资助的千年生态系统评估项目^[6]，将生态系统服务价值研究进一步推向了新的高度，并使其成为生态环境研究领域的热点、焦点和交叉研究前沿领域^[7]。国内外学者已在不同尺度、不同类型生态系统服务价值及其评价技术框架与方法研究方面取得了丰硕成果^[8~17]。近年来，随着 RS&GIS 技术的发展，将遥感信息数据与生态学模型结合，利用 GIS 技术评估区域 ESV，以及对区域 ESV 进行空间制图模拟的研究日益增多^[18~25]。目前学者们结合各自研究区域的特殊环境特征，基于空间统计与分析，将 GIS 与 ESV 制图联系起来，对多种生态系统服务类型进行了制图及时空演变分析，其结果为区域生态环境保护决策与管理规划的制定提供了科学依据^[22, 26~28]。ESV 制图可直观展现其在时空上的分布特点，有利于生动表现生态系统服务价值时空演化特征，揭示并把握其时空分布规律^[29]，并推动区域生态服务价值时空变化的研究。

湖南省地处长江中游，生态地位十分重要，对维系整个长江中下游水系生态安全，促进中下游地区可持续发展承担着极其重要的支撑功能。近年来，湖南省土地利用/覆被变化显著，局部土地生态风险加剧，生态环境质量与生态承载力呈下降趋势^[30]。本研究在 GIS 及 ESV 评估模型的支持下，基于湖南省 1990~2015 年土地利用/覆被变化数据，对其 ESV 进行评估，并进行 ESV 空间分布的制图模拟以及时空演变研究，揭示生态系统服务价值的空间格局及其演化特征，以期为协调区域经济发展和生态环境保护之间的关系，制定区域生态安全管控决策以及土地利用优化配置提供参考。

1 研究区域

湖南省地处 108° 47' ~114° 13' E、24° 39' ~30° 08' N，总面积 21.18×10⁴km²。从自然条件看，湖南是一个资源大省和生态大省。据全国生存资源禀赋评价结果，湖南省列全国第 9 位^[31]。该区地处东部沿海地区和中西部地区过渡带、长江开放经济带和沿海开放经济带（“一带一部”）的重要接合部位，其地理区位及交通条件优越，生态地位突出，经济发展水平较高。2016 年湖南省总人口 6822 万，GDP31244.7 亿元，城镇化率 52.75%。但由于位于全国 3 条易灾带的中部地带^[32]，特殊的地理区位决定了生态环境的敏感性、脆弱性。近年来，随着区域经济社会的快速发展，土地开发利用程度加剧，生态系统服务功能被损害和削弱的风险加大。因此，对该区域进行生态系统服务价值评估及其时空演变研究具有重要的现实意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

土地利用/覆被数据来源于研究区域 1990、2000、2005、2010 和 2015 年的 Landsat ETM、Landsat TM 影像（空间分辨率 30m×30m）的解译（图 1），并依据中科院《国家资源环境遥感宏观调查、动态分析与遥感技术前沿的研究》，借助 Arc GIS 软件，将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 个一级类及 25 个二级分类类型。为提高生态系统服务价值时空分异分析精度和效果，将研究区域划分为 10km×10km 大小网格单元，分别计算各单元生态系统服务价值，并将其赋值到网格矢量文件和单元几何中心点矢量文件属性表，绘制生态系统服务价值空间格局图。

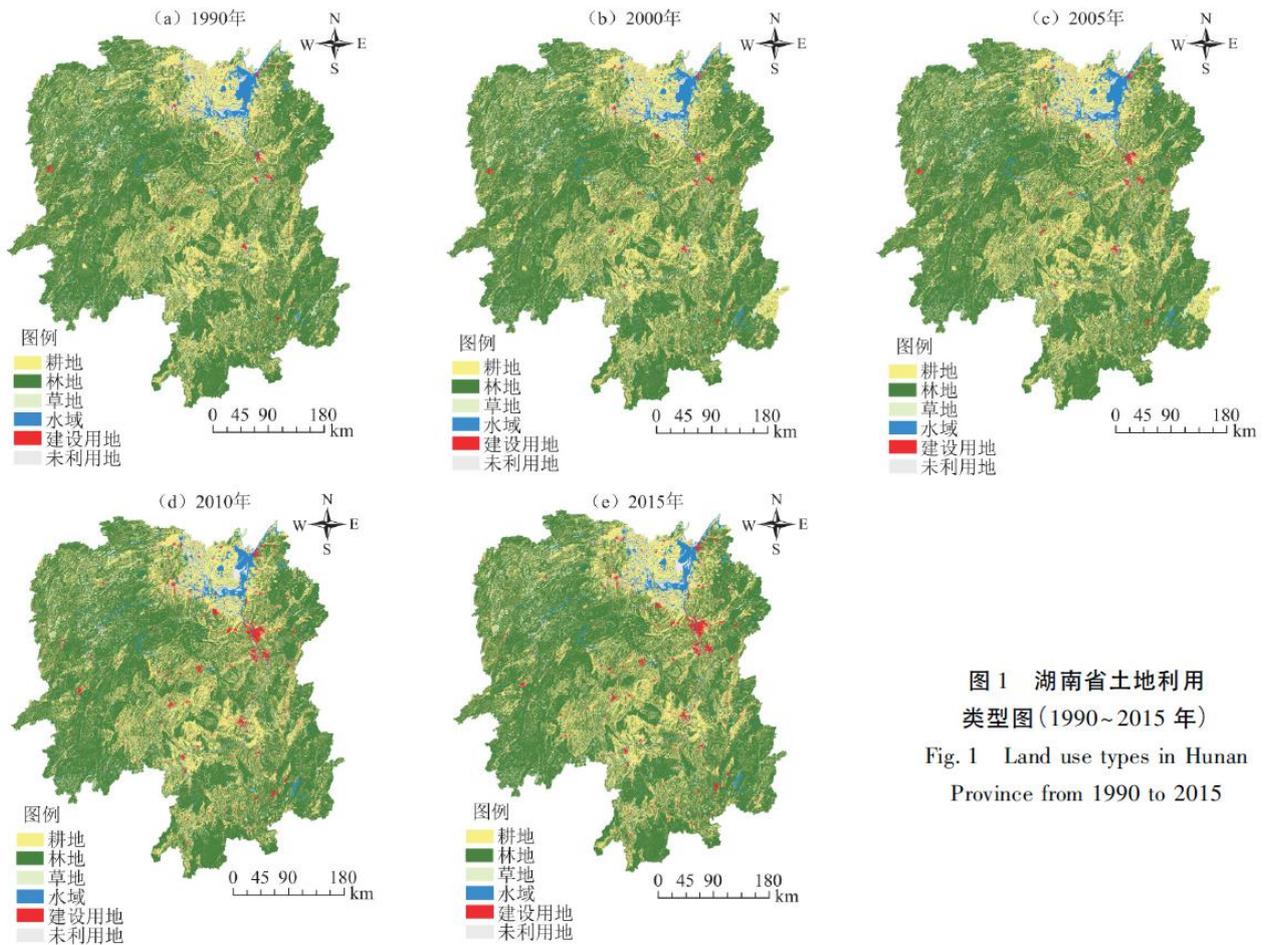


图 1 湖南省土地利用类型图 (1990~2015 年)
Fig. 1 Land use types in Hunan Province from 1990 to 2015

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值 ESV 评估

Costanza 等^[4]提出的生态系统服务价值计算原理与方法已成为 ESV 研究的基础,我国学者谢高地等^[33~35]基于专家知识对 Costanza 的 ESV 研究方法进行改进,得出了适合中国国情的生态系统单位面积生态服务价值。考虑到区域的差异性和可比性,本文进一步根据谢高地等提出的生态服务价值区域修正系数(湖南省为 1.95)^[22, 36],制定湖南省不同生态系统服务价值评估系数表(表 1),以此评估计算该区域不同时期的生态系统服务价值。

表 1 各地类生态系统单位面积服务价值系数(元/(hm²·a))

生态系统服务	耕地	林地	草地	水域	未利用地
气体交换	2 773.58	16 641.50	5 778.30	1 964.62	231.13
气候调节	3 736.63	15 678.45	6 009.43	7 935.53	500.79
水源涵养	2 966.19	15 755.50	5 855.34	72 305.78	269.65

土壤形成与保护	5 662.73	15 485.84	8 628.93	1 579.40	654.87
废物处理	5 354.56	6 625.78	5 084.90	57 205.16	1 001.57
生物多样性保护	3 929.24	17 373.42	7 203.61	13 213.04	1 540.88
食物生产	3 852.20	1 271.23	1 656.45	2 041.67	77.04
原材料	1 502.36	11 479.55	1 386.79	1 348.27	154.09
娱乐休闲	654.87	8 012.57	3 351.41	17 103.77	924.53
合计	30 432.38	108 323.85	44 955.17	174 697.25	5 354.56

ESV 的计算公式如下^[4]：

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \quad (1)$$

$$ESV = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (2)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值(元); A_k 为研究区 K 类土地的面积(hm^2); VC_k 为该类土地单位面积的价值系数($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); ESV_f 为生态系统单项服务价值(元); VC_{fk} 是单项服务价值系数($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

2.2.2ESV 敏感性分析

为验证生态系统类型对于各土地利用类型的代表性和价值系数的准确性,应用敏感性指数(CS)以确定 ESV 随时间变化对 VC 变化的依赖程度。若 $CS > 1$, 表明 ESV 对 VC 是富有弹性的;相反,若 $CS < 1$, 则说明是缺乏弹性的。比值越大,表明 VC 的准确性越关键。ESV 敏感性计算公式如下:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (3)$$

式中:ESV 为总生态系统服务价值; VC 为生态价值系数; i 和 j 分别代表初始总价值和生态价值系数调整以后的总价值; K 为各土地利用类型。

2.2.3ESV 演变的空间统计分析

(1)空间自相关 Global Moran' s I 分析

Global Moran's I 是描述研究区域不同单元 ESV 分布格局的空间相似程度，即空间自相关性^[20, 37, 38]。I 指数取值范围为 $[-1, 1]$ ，若 $I > 0$ ，表示空间呈正相关，值越大表示单元间的空间相关性越明显，性质越相似；相反， $I < 0$ 表示空间呈负相关，且值越小表示单元间的空间差异越大，分布越不集中；若 $I = 0$ ，则表示单元间不相关，空间呈随机性。Global Moran's I 计算公式如下所示：

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中： x_i 、 x_j 分别为空间单元 i 、 j 的 ESV 值； \bar{x} 为 ESV 的均值； W_{ij} 为二进制空间权重矩阵； n 为空间单元数量。同时，可用标准化统计量 $Z(I)$ 来检验空间自相关的显著性水平， $Z(I) = (I - E(I)) / \sqrt{\text{Var}(I)}$ ，其中 $E(I)$ 和 $\text{Var}(I)$ 分别为 I 的期望值与理论方差值。 $Z(I)$ 在 $-1.65 \sim 1.65$ 范围之间，表示空间随机，越大于此范围表示空间聚集越显著，越小于此范围表示空间分散越显著。

(2) 高低聚类 Getis-Ord General G 分析

Global Moran's I 指数能发现 ESV 空间自相关性的存在模式，而 Getis-Ord General G 可用于探测空间单元 ESV 是否存在高值或低值聚集的空间分布模式^[7, 22]。计算公式如下：

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j} \quad (i \neq j) \quad (5)$$

式中： x_i 、 x_j 、 W_{ij} 、 j 、 n 的含义与公式 (5) 相同。G 指数取值范围为 $[0, 1]$ ，值越高越趋向于高值聚集，值越小则表示低值聚集。同时，可用 G 值与其理论期望值 $E(G)$ 的比较及其标准化统计量 $Z(G)$ 的显著性判断，分析 ESV 动态变化的空间聚集特征。若 $G > E(G)$ 且 $Z(G)$ 显著时，检测出高值聚集； $G < E(G)$ 且 $Z(G)$ 显著时，检测出低值聚集。

(3) 冷/热点区 Getis-Ord G_i^* 演化分析

Getis-Ord G_i^* 指数用于检测生态系统服务价值变化在空间上的聚集程度，即 ESV 动态变化的“冷/热点”分布格局^[22]。 G_i^* 指数的 Z 得分越高，表示高值(热点)的聚集越紧密，单元周围的属性值相对较高；分数越低，则说明低值(冷点)的聚集越紧密，单元周围的属性值相对较低。 G_i^* 指数计算公式如下所示：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{i=1}^n W_{i,j}}{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^n W_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{i,j} \right)^2 \right] / (n-1)}} \quad (6)$$

式中： \bar{x} 为 ESV 的均值； x_j 为空间单元 j 的 ESV 指数变化量 (DESV)； $W_{i,j}$ 为二进制空间权重矩阵； n 为空间单元数量。

3 结果与分析

3.1 土地利用/覆被变化

1990~2015 年湖南省土地利用变化的总体趋势为：耕地、林地、草地面积减少，其余类型用地面积增加 (表 2)。在动态变化率上，建设用地变化幅度最大，变化率达 85.95%；其次为未利用地，变化率达 22.10%；草地、耕地、水域、林地的变化率分别为 -9.32%、-3.19%、1.27%、-0.05%。建设用地一直处于增加趋势，草地则一直处于减少趋势。但各类用地的变化在不同时段存有差异，呈波动变化态势。如耕地在 1990~2000 年呈增长趋势，随后一直处于减少态势，特别是在 2010~2015 年减少幅度较大，达 2372.80km²。林地在 1990~2010 年期间呈减少趋势，随后呈增长态势，且总量增加较大，达 757.17km²；水域在 1990~2005 年期间呈增加之势，随后呈减少状态。未利用地在 1990~2005 年一直呈减少趋势，2005 年后则处于增长状态。

表 2 湖南省土地利用变化 (1990 ~ 2015 年)

指标	年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
面积 (km ²)	1990	61 470.95	132 283.59	7 610.32	6 076.68	2 642.87	1 745.84
	2000	61 885.71	131 458.90	7 571.74	6 317.82	2 879.19	1 716.90
	2005	61 552.94	131 391.38	7 533.16	6 443.21	3 236.07	1 673.50
	2010	61 350.38	131 290.10	7 494.58	6 399.81	3 501.33	1 794.07
	2015	59 512.91	132 216.07	6 901.38	6 153.85	4 914.40	2 131.66
面积变化 (km ²)	1990~2000	414.76	-824.69	-38.58	241.14	236.32	-28.94
	变化率 (%)	0.67	-0.62	-0.51	3.97	8.94	-1.66
面积变化 (km ²)	2000~2005	-332.77	-67.52	-38.58	125.39	356.88	-43.40
	变化率 (%)	-0.54	-0.05	-0.51	1.98	12.40	-2.53
面积变化 (km ²)	2005~2010	-202.56	-101.28	-38.58	-43.40	265.25	120.57
	变化率 (%)	-0.33	-0.08	-0.51	-0.67	8.20	7.20
面积变化 (km ²)	2010~2015	-1 837.47	925.97	-593.20	-245.96	1 413.07	337.59
	变化率 (%)	-3.00	0.71	-7.92	-3.84	40.36	18.82
面积变化 (km ²)	1990~2015	-1 958.04	-67.52	-708.95	77.16	2 271.52	385.82
	变化率 (%)	-3.19	-0.05	-9.32	1.27	85.95	22.10

3.2 生态系统服务价值的变化

3.2.1 总生态系统服务价值变化

1990~2015年,湖南省总ESV呈减少趋势,由 1811.1194×10^8 元减少到 17530.00×10^8 元(表3),减少了0.47255%。在1990~2000年、2005~2010年、2010~2015年这3个研究时段中,总ESV均呈减少趋势,减少率分别为0.2071%、0.1468%、0.1335%。2000~2005年总ESV略微有所增长,但增长率仅0.0142%。究其原因在于水域面积的增加导致ESV增加,同时由于耕地、林地、草地等用地类型减少幅度下降,进而使研究区域总的ESV略有增加。从各土地利用类型的ESV来看,耕地、林地、草地的ESV均呈减少趋势,其他用地类型的ESV呈增加趋势。需要说明的是,水域的ESV在1990~2005年呈增长趋势,但2005年后ESV一直呈减少态势,尤其是在2010~2015年减少幅度较大,达 42.9687×10^8 元。1990~2015年湖南省总ESV下降的主要原因在于耕地、林地、草地ESV的减少,三类用地ESV减少值为研究区总ESV增加值的6.35倍,三类用地对区域生态系统服务价值变化的贡献率占到了86.4%,因此,由水域、未利用地等增加的ESV在绝对数量上远不及由耕地、林地、草地减少所损失的生态服务价值。

表3 湖南省各地类的ESV变化(1990~2015年)

土地利用 类型	生态系统服务价值ESV (10 ⁸ 元)					1990~2000年	
	1990年	2000年	2005年	2010年	2015年	变化值 (10 ⁸ 元)	变化率(%)
耕地	1 870.707 3	1 883.329 3	1 873.202 3	1 867.038 1	1 811.119 4	12.622 1	0.674 7
林地	14 329.467 8	14 240.133 9	14 232.82	14 221.849 2	14 322.153 9	-89.333 9	-0.623 4
草地	342.123 3	340.388 8	338.654 4	336.919 9	310.252 5	-1.734 5	-0.507
水域	1 061.579 7	1 103.705 9	1 125.611 5	1 118.028 8	1 075.060 1	42.126 2	3.968 3
建设用地	0	0	0	0	0	0	0
未利用地	9.348 2	9.193 3	8.960 9	9.606 4	11.414 1	-0.154 9	-1.657 5
合计	17 613.226 3	17 576.751 2	17 579.249	1 17 553.442 4	17 530	-36.475	-0.207 1

续表1

类型	变化值 (10 ⁸ 元)	变化率 (%)						
耕地	-10.127	-0.537 7	-6.164 3	-0.329 1	-55.918 7	-2.995	-59.587 9	-3.185 3
林地	-7.313 9	-0.051 4	-10.970 8	-0.077 1	100.304 7	0.705 3	-7.313 9	-0.051
草地	-1.734 5	-0.509 6	-1.734 5	-0.512 2	-26.667 4	-7.915 1	-31.870 8	-9.315 6
水域	21.905 6	1.984 7	-7.582 7	-0.673 7	-42.968 7	-3.843 3	13.480 4	1.269 8

建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0
未利用地	-0.232 4	-2.528 1	0.645 6	7.204 6	1.807 7	18.81 7 2	2.065 9	22.099 4
合计	2.497 8	0.014 2	-25.806 7	-0.146 8	-23.442 4	-0.133 5	-83.226 3	-0.472 5

3.2.2 单项生态系统服务价值变化

从湖南省 ESV 的构成来看(表 4), 各单项生态服务价值所占比例的大小依次为:水源涵养>生物多样性保护>土壤形成与保护>气体交换>气候调节>原材料>废物处理>娱乐休闲>食物生产。其中, 水源涵养的价值最大, 占总 ESV 的 15.66%, 其次是生物多样性保护、土壤形成与保护、气体交换、气候调节, 分别占总 ESV 的 15.20%、14.01%、13.79%、13.61%, 以上 5 种价值占总 ESV 的 3/4 左右。食物生产价值占总 ESV 的比例最低, 仅为 2.40%。

表 4 湖南省 ESV 结构变化(1990 ~ 2015 年)

生态系统 服务	生态系统服务价值 ESV (10 ⁸ 元)					1990~2000 年		
	1990 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	变化值 (10 ⁸ 元)	变化率 (%)	
气体交换	2 428.2086	2 415.8789	2 413.8457	2 411.3182	2 417.7984	-12.3296	-0.5078	
气候调节	2 398.5255	2 388.8126	2 387.2521	2 384.3914	2 386.6957	-9.7129	-0.405	
水源涵养	2 750.9397	2 756.3784	2 763.1565	2 757.6282	2 745.6003	5.4388	0.1977	
土壤形成与保护	2 473.0256	2 462.6322	2 459.5389	2 456.501	2 455.1493	-10.3934	-0.4203	
废物处理	1 593.6957	1 604.0215	1 608.7257	1 604.4117	1 583.9596	10.3258	0.6479	
生物多样性保护	2 677.5558	2 667.7214	2 666.5529	2 663.338	2 665.1963	-9.8344	-0.3673	
食物生产	430.1085	431.084	429.905	428.8527	421.4928	0.9755	0.2268	
原材料	1 629.9235	1 621.3467	1 620.1805	1 618.6202	1 625.3871	-8.5768	-0.5262	
娱乐休闲	1 231.2406	1 228.8726	1 230.0889	1 228.3845	1 228.7178	-2.368	-0.1923	
合计	17 613.2236	17 576.7485	17 579.2464	17 553.4397	17 529.9973	-36.475	-0.2071	
	2000~2005 年		2005~ 2010 年		2010~2015 年		1990~2015 年	
生态系统 服务	变化值 (10 ⁸ 元)	变化率 (%)	变化值 (10 ⁸ 元)	变化率 (%)	变化值 (10 ⁸ 元)	变化率 (%)	变化值 (10 ⁸ 元)	变化率 (%)
气体交换	-2.0332	-0.0842	-2.5276	-0.1047	6.4803	0.2687	-10.4101	-0.0043
气候调节	-1.5606	-0.0653	-2.8607	-0.1198	2.3043	0.0966	-11.8299	-0.0049
水源涵养	6.7781	0.2459	-5.5283	-0.2001	-12.0279	-0.4362	-5.3394	-0.0019
土壤形成与保护	-3.0933	-0.1256	-3.0379	-0.1235	-1.3518	-0.055	-17.8764	-0.0072
废物处理	4.7042	0.2933	-4.3141	-0.2682	-20.4521	-1.2747	-9.7361	-0.0061
生物多样性保护	-1.1686	-0.0438	-3.2211	-0.1208	1.8645	0.070	-12.3595	-0.0046
食物生产	-1.179	-0.2735	-1.0523	-0.2448	-7.36	-1.7162	-8.6157	-0.02
原材料	-1.1662	-0.0719	-1.5604	-0.0963	6.7669	0.4181	-4.5364	-0.0028
娱乐休闲	1.2163	0.099	-1.7044	-0.1386	0.3333	0.0271	-2.5227	-0.002
合计	2.4979	0.014 2	-25.8067	-0.1468	-23.4424	-0.1335	-83.2263	-0.0047

由表 4 可以看出, 1990~2015 年总体上湖南省各单项 ESV 均呈下降趋势, 但变化幅度缓慢, 变化率在 0.0019%~0.0200% 之间。在单项生态系统服务价值中, 气体交换、气候调节、废物处理、土壤形成与保护、生物多样性保护、食物生产的价值减少较多, 对总 ESV 减少的贡献率分别为: 12.51%、14.21%、21.48%、11.70%、14.85%、10.35%, 上述 6 种单项价值对总 ESV 减少的贡献率之和达 85.1%; 水源涵养等其他单项 ESV 对总 ESV 减少的贡献率仅占 15.9%。从不同时段来看, 各单项 ESV 的变化存在差异。1990~2000 年, 气体交换、气候调节、土壤形成与保护、生物多样性保护、原材料、娱乐休闲价值均呈下降趋势, 其中气体交换、气候调节、土壤形成与保护价值减少较多, 其减少的价值量分别为 12.3296×10^8 元、 9.7129×10^8 元、 10.3934×10^8 元; 水源涵养、废物处理、食物生产价值均呈增长趋势, 其中废物处理价值增加最多, 达 10.3258×10^8 元。2005~2010 年, 各单项 ESV 均呈减少趋势, 其中水源涵养、废物处理的价值减少较多, 分别为 5.5283×10^8 元、 4.3141×10^8 元。2010~2015 年, 气体交换、气候调节、生物多样性保护、原材料、娱乐休闲价值均呈增长趋势, 其他单项 ESV 呈减少态势。其中, 气体交换、原材料价值增加较大, 分别为 6.4803×10^8 元、 6.7669×10^8 元; 废物处理、水源涵养价值减少最多, 分别为 20.4521×10^8 元、 12.0279×10^8 元。

3.3 敏感性分析

由表 5 可知, ESV 对 VC 的敏感性指数小于 1, 敏感性大小依次为: 林地 > 耕地 > 水域 > 草地 > 未利用地。敏感性分析表明, 研究区域的 ESV 对价值系数 VC 的变化是缺乏弹性的, 生态价值系数可靠, 研究结果可信。

表 5 湖南省 ESV 对其价值系数的敏感程度

土地利用 类型	年份				
	1990	2000	2005	2010	2015
耕地	0.1062	0.1071	0.1066	0.1064	0.1033
林地	0.8136	0.8102	0.8096	0.8102	0.8170
草地	0.0194	0.0194	0.0193	0.0192	0.0177
水域	0.0603	0.0628	0.0640	0.0637	0.0613
未利用地	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0007

3.4 生态系统服务价值的总体分布格局

结合上述 ESV 估算模型, 在 ArcGIS 支持下, 基于 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的格网计算研究区域 5 个时期的均值, 绘制 ESV 空间分布格局图, 并将 ESV 划分为 5 级: 低值 ($< 3.5 \times 10^8 \text{元} \cdot \text{km}^{-2}$)、较低值 ($3.5 \times 10^8 \sim 6.5 \times 10^8 \text{元} \cdot \text{km}^{-2}$)、中等值 ($6.5 \times 10^8 \sim 8.8 \times 10^8 \text{元} \cdot \text{km}^{-2}$)、较高值 ($8.8 \times 10^8 \sim 11 \times 10^8 \text{元} \cdot \text{km}^{-2}$)、高值 ($> 15 \times 10^8 \text{元} \cdot \text{km}^{-2}$)。

从 ESV 的空间格局看(图 2), 总体上湖南省生态系统服务价值空间格局的等级差异明显, ESV 高值区与低值区相互溶解渗透, 高值区与次高值区对低值区呈包围态势。高值和较高值区分布较均匀、低值与较低值区分布较集中, 中等值区分布较为散乱, 呈随机镶嵌结构分布格局。ESV 高值区与较高值区主要分布在洞庭湖水域以及湘西武陵山—雪峰山、湘南南岭山地、湘东幕阜山—罗霄山等林地比例较高的区域; 洞庭湖平原区、涟邵丘陵盆地区、长株潭城市群及其它各市市辖区及其周边区域分别因农田和建设用地比例较高而成为生态系统服务价值低值区。

3.5 空间自相关与冷热点区演化

3.5.1 空间自相关分析

研究区域 5 个年份生态系统服务价值的 I 指数均大于 0，且 Z(I) 值均远高于 1% 显著性水平标准值 1.65 (表 6)，表明区域生态服务价值的空间分布具有较强的空间自相关性(关联性)，在空间上呈聚集分布格局；另外，I 指数和 Z(I) 值均呈下降趋势，这说明区域生态服务价值的空间自相关性及空间集聚现象趋于减弱。同时，分析 ESV 动态变化的空间自相关性发现，其 I 指数均大于 0，且 DESV 在 1990~2000 年、2000~2005 年、2005~2010 年、2010~2015 年间的空间自相关 I 指数均呈现下降趋势，由此说明研究区生态系统服务价值动态演化过程也具有空间自相关性和空间聚集效应，但这种现象也趋于减弱。

表 6 湖南省空间自相关与高/低聚类指数

年份	ESV 空间自相关		DESV 空间自相关		ESV 的 G 统计		
	I	Z(I)	I	Z(I)	G	E(G)	Z(G)
1990	0.233979	17.616600	-	-	0.003 518	0.003 248	30.731 359
2000	0.230732	17.063600	0.543212(1999~2000)	48.018 824(1990~2000)	0.003 518	0.003 248	30.236 529
2005	0.230721	16.224700	0.511 123(2000~2005)	38.053 842(2000~2005)	0.003 518	0.003 248	30.236 106
2010	0.221848	16.118700	0.420 169(2005~2010)	35.365 207(2005~2010)	0.003 518	0.003 248	30.206 885
2015	0.217767	15.571700	0.411 327(2010~2015)	32.162 181(2010~2015)	0.003 514	0.003 248	29.822 254

3.5.2 空间分布模式

研究区域 ESV 的高/低值的聚类指数计算结果如表 6 所示，G 值与 E(G) 值均较小且非常接近，但总体上 G 值均大于相应的 E(G) 值，且 Z(G) 值显著，这表明湖南省区域 ESV 空间分布及其动态变化过程均存在高值聚集模式。但同时 Z(G) 值呈下降趋势，则说明 ESV 空间分布及其动态变化的高值聚集程度均有所减弱，其空间分布形态发生了一定程度的变化。相对而言，研究区生态系统服务价值空间分布低值聚集的现象无高值聚集现象显著。

3.5.3 冷/热点区分布演化

对区域 5 个研究年份的 ESV 分别进行热点分析 (G_i^*)，用 Jenks 自然断点法^[22] 将其标准化 Z 值划分为 < -2.75 、 $-2.75 \sim -1.28$ 、 $-1.28 \sim -0.25$ 、 $-0.25 \sim 0.66$ 、 $0.66 \sim 1.58$ 、 $1.58 \sim 2.75$ 、 > 2.75 共 7 个等级，以此绘制 ESV 热点区空间分布格局图 (图 3)。

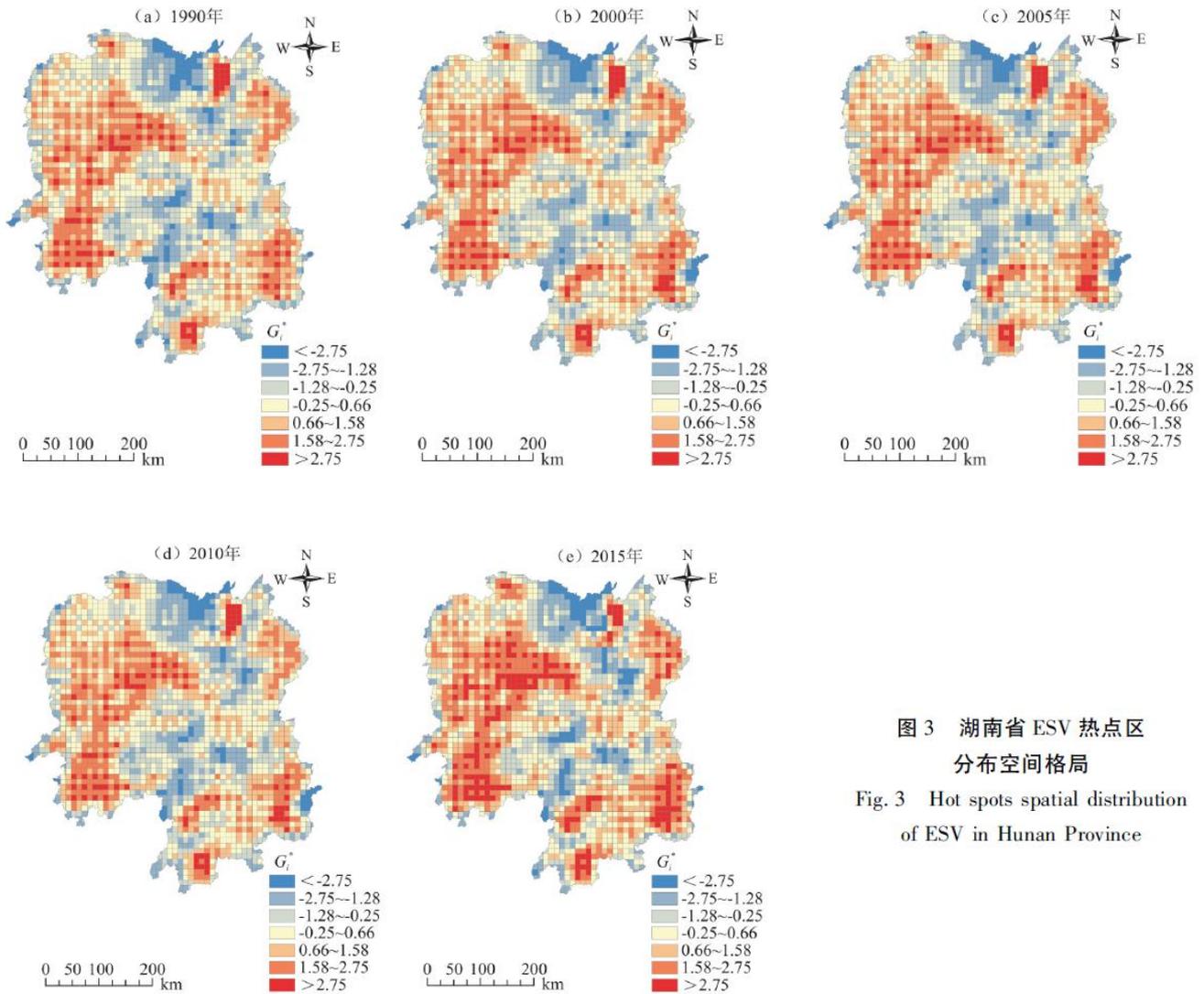


图3 湖南省ESV热点区分布空间格局

Fig. 3 Hot spots spatial distribution of ESV in Hunan Province

(1) 1990~2000年,ESV增值热点区主要分布在湖南西部湘西自治州和怀化市的古丈县、辰溪县、沅陵县、溆浦县、通道县等;湘北洞庭湖区常德市的津市市、汉寿县、安乡县、南县,岳阳市的平江县、岳阳县等;湘南郴州市的资兴市、桂东县,衡阳市的衡山县、衡东县等;湘东长沙市的宁乡县、浏阳市,株洲市的茶陵县、攸县等;湘中地区娄底市的涟源市等区域。究其主要原因,一方面热点区内县市加强植树造林,林地面积增加;另一方面,洞庭湖区域在1998年开始实施“退田还湖”生态政策并取得了较好的效果。而ESV价值损失冷点区则主要分布在湘西地区的新晃县、江永县、江华县等;湘中南地区的洞口县,湘南地区的汝城县、东安县等,湘东地区的耒阳市等,以及湖南14个市州市辖区及其周边区域。主要原因在于多地存在毁林开荒现象且数量较多,同时由于城市扩张导致建设用地占用大量耕地、林地等。

(2) 2000~2005年,湖南省ESV增值热点及ESV损失冷点区动态变化显著程度不高,总体上各评价单元的变化度不大。ESV增值热点区主要分布在湘北环洞庭湖区的岳阳市的湘阴县、平江县,常德市的津市市、汉寿县、澧县、鼎城区,益阳市的沅江市等区域,显示了“退田还湖”生态政策持续落实的成果,水域面积增加。ESV价值损失冷点区则大幅收缩,主要零星分布在14个市州市辖区及其周边区域,城镇化的推进、城市发展及农村宅基地扩张导致用地占用大量耕地等。

(3) 2005~2010年,湖南省ESV增值热点区主要分布在湘西地区怀化市的中方县、洪江市、沅陵县,湘西自治州的凤凰县、泸溪县、保靖县、花垣县,张家界市的永定区、武陵源区,邵阳市的城步县、新宁县;湘北地区常德市的安乡县、石门县、澧

县, 益阳市的沅江市、资阳区, 岳阳市的汨罗市、湘阴县的部分区域。其原因主要得益于“退耕还林”、水生态建设等政策的实施。ESV 损失冷点区则主要分布在岳阳市的华容县、岳阳县及汨罗市东部及南部区域, 常德市的汉寿县, 益阳市的南县、桃江县部分区域。湘南郴州市的桂东县、汝城县、宜章县, 永州市的东安县、道县、零陵区、冷水滩区, 衡阳市的衡东县等; 湘中地区娄底市的双峰县; 湘东地区株洲市的攸县、醴陵市, 长沙市的浏阳市以及城市市辖区等。ESV 价值损失的主要原因与城镇化的发展、城市扩张及基础设施的建设等导致农用地的大量占用有关。

(4) 2010~2015 年, 研究区域 ESV 增值热点区主要分布在湘西地区张家界市的桑植县、慈利县, 湘西自治州的保靖县、花垣县、古丈县, 怀化市的溆浦县、沅陵县; 湘南地区郴州市的桂东县、桂阳县、资兴市, 永州市的城步县、新宁县、江华县、宁远县、蓝山县; 湘东地区长沙市的宁乡县、浏阳市, 株洲市的茶陵县, 湘潭市的韶山市; 湘北地区常德市的安乡县、桃源县, 岳阳市的平江县, 益阳市的桃江县、安化县, 衡阳市的衡阳县、衡山县等。其 ESV 增长的原因主要得益于湖南大力推进生态公益林保护建设、“绿色湖南”建设等政策的实施, 且成效较显著。ESV 损失冷点区则主要分布在长株潭城市群区、环洞庭湖区、湘中南地区, 主要包括长沙市、湘潭市、株洲市、常德市、岳阳市和衡阳市、郴州市市辖区及其周边县市区域, 以及邵阳市的邵阳县、邵东县, 永州市的祁阳县, 娄底市的娄星区等。总体来看, 损失冷点区主要分布在城镇人口活动密集区以及滨湖水土资源富集区域。其 ESV 损失的主要原因与工业化、城镇化的加快发展, 城市扩张等导致建设用地对其它土地利用类型的占用。这些区域往往是城乡建设与耕地开垦的重点区域, 在产生良好经济与社会效益的同时, 也造成区域生态系统服务价值的损失。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 湖南省 1990~2015 年土地利用/覆被变化 (LUCC) 显著, 总体趋势表现为耕地、林地、草地面积减少, 其余类型用地面积增加, 但各时段存有差异, 呈波动变化态势。其中, 建设用地变化幅度最大, 且一直呈增长趋势; 林地虽然减幅较小, 但各时段变化差异较大, 且后期总量增加较大, 达 757.17km^2 ; 水域总体呈增长趋势, 但阶段变化差异明显。在 1990~2005 年期间呈增加之势, 随后呈减少状态。

(2) 研究区域生态系统服务价值呈减少态势, ESV 净减少 83.2263×10^8 元, 但价值净损失速度有下降的趋势。ESV 减少的主要原因在于耕地、林地、草地面积的减少, 三类用地 ESV 的减少值为研究区 ESV 增加值的 6.35 倍。单项生态服务价值中, 水源涵养、生物多样性保护、土壤形成与保护、气体交换、气候调节这 5 种生态服务价值的贡献较大, 占总生态服务价值的 $3/4$ 左右; 生态系统服务价值最低的是食物生产功能, 仅占总 ESV 价值的 2.40%。

(3) 总体上湖南省生态系统服务价值空间格局的等级差异明显, ESV 高值区与低值区相互溶解渗透, 高值区与较高值区对低值区呈包围态势。ESV 高值和较高值区分布较均匀、低值与较低值区分布较集中, 中等值区分布较为散乱, 呈随机镶嵌结构分布格局。生态系统服务价值高值区与较高值区主要分布在洞庭湖水域以及湘西武陵山—雪峰山、湘南南岭山地、湘东幕阜山—罗霄山等林地比例较高的区域; 洞庭湖平原区、涟邵丘陵盆地、长株潭城市群及其它各市市辖区及其周边区域分别因农田和建设用地比例较高而成为生态系统服务价值低值区。

(4) 湖南省的 ESV 及其动态演化表现出明显的空间自相关与高低值聚集现象, 但其自相关与聚集程度呈现减弱趋势, 即其空间分布的破碎化程度在增加, ESV 高值区的聚集度也有所下降。“退田还湖”、“退耕还林”、“绿色湖南”等生态政策的有效实施, 对湖南省 ESV 的增值起到了重要作用, 由此形成了若干个增值热点区, 但热点区范围和“热度”在研究时段后期呈减少趋势。城镇化、城市扩张与土地开发等人类活动是造成研究区域 ESV 损失的主要原因, 并形成了较多价值损失冷点区, 且冷点区的形成与区域水土资源条件、土地开发强度等人类活动等表现出一定的关联性。

4.2 讨论

(1) 本文基于土地利用/覆被变化, 评估了研究区域的 ESV, 并结合空间统计探讨了 ESV 的时空格局演变。研究结果可为研究区域生态建设与生态系统管控, 科学合理地制定土地利用优化配置方案提供参考。本研究采用基于专家知识的评估方法与模型, 且采用的生态服务价值系数是利用湖南省所在区域的同一套修正系数而制定, 未考虑不同生态系统类型修正系数的差异, 也未考虑同样生态系统类型由于生态系统质量的差异导致的服务价值的差异, 因此在一定程度上影响了 ESV 评估的精度。同时, 若能细分土地利用类型以及采用生态系统二级类型的生态价值系数, 其研究结果将更为可靠, 利用高分辨率的遥感影像资料开展 ESV 评估及时空格局分析也将提高分析结果的精确度。此外, 加强土地利用转型过程(各土地利用类型间的内部转换)与 ESV 变化的分析, 有助于揭示区域土地利用/覆被变化与生态系统服务价值变动的内在联系与影响机理, 以上工作有待进一步的深入研究。

(2) 土地利用/覆被变化受区域国土开发、城镇化发展、环保政策、生态工程建设等影响, 为土地利用结构及空间变化的主要原因, 由此驱动区域生态系统结构与服务功能的演变 [19]。同时, 土地利用方式的时空累积必然导致土地利用结构的变化, 而土地利用结构的变化又对区域生态格局与生态过程产生影响, 进而导致生态系统服务功能的时空变化。在正反“双重”土地利用方式下, 区域形成了独特的生态系统服务价值时空格局。其中, 有利于生态系统功能恢复的生态工程建设积极作用显著, 土地开发强度加剧、快速城镇化等人为扰动的消极影响也较明显。因此, 合理优化土地利用结构与土地利用空间布局是区域社会—经济—生态协调发展的重要内容。

(3) 由于湖南省生态服务功能价值正呈下降态势, 在区域土地开发利用过程中需要处理好发展与保护的关系。土地开发必须凸显生态环境保护目标, 改善并维护区域生态系统的结构和功能, 维护和强化区域整体生态系统格局的连续性, 以此构建生态良好的土地利用格局。结合国家和湖南省生态保护红线规划、自然生态空间用途管制等, 在注重经济发展目标的同时, 应积极引导城乡建设向丘岗区拓展用地空间, 尽量避免农田、林地、水域等土地面积的盲目开发, 努力构建“山、水、田、乡、城”有机结合的土地利用空间格局 [39]。充分考虑区域人地关系, 因地制宜, 建设以集中连片的林地、草地和基本农田为主体的土地生态安全屏障, 协调配置生产、生活与生态用地, 形成功能互补的土地利用空间格局和城乡建设布局。加强湖南省内重要河流、湿地和滩涂等生态系统服务价值高的生态用地保护, 划定禁止、限制和允许建设地区。同时, 加强对水域、林地的生态补偿强度, 加快建立生态保护红线区生态补偿机制及相关政策的实施。加强区域间生态问题联防联控联防, 积极维持 ESV 中、高值区的空间稳定性, 重点监测 ESV 损

失冷点区, 严格控制冷点区范围, 引导土地利用向生态系统服务价值保值和增值方向发展。

参考文献:

[1] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1977.

[2] WESTMAN W. How much are nature's services worth? [J]. Science, 1977, 197: 960—964.

[3] LI Y R, LONG H L, LIU Y S. Industrial development and land use /cover change and their effects on local environment: A case study of Changshu in eastern coastal China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010, 4 (4) :438—448.

[4] CONSTANZA R, D' ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253—260.

[5] TUMER B L, SKOLE D, SANDERSON S, et al. Land-use and land-cover change: science research plan [R]. IGBP Report No. 35 /HDP Report No. 7. Stockholm: IGBP, 1995.

-
- [6] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Wellbeing: Biodiversity Synthesis* [M]. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.
- [7] 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 [J]. *资源科学*, 2015, 37(12) : 2451—2460.
- TU X S, LONG H L. Spatial patterns and dynamic evolution of ecosystem service values in Poyang Lake Region from 2000 to 2010 [J]. *Resources Science*, 2015, 37(12) : 2451—2460.
- [8] WILGEN V B, COWLING RM, BURGERS C J. Valuation of ecosystem services: a case study from South African fynbos ecosystems [J]. *Bio Science*, 1996, 46: 184—189.
- [9] LAUTENBACH S, KUGEL C, LAUSCH A, et al. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data [J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2) : 676—687.
- [10] GROOT R, BRANDER L, PLOEG S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units [J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1) : 50—61.
- [11] WAINGER L A, KING D M, MACK R N, et al. Can the concept of ecosystem services be practically applied to improve natural resource management decisions? [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69: 978—987.
- [12] SONG W, DENG X Z, YUAN Y W, et al. Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain [J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 245—253.
- [13] 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 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(4) : 441—446.
- FU B J, ZHANG L W. Landuse change and ecosystem services: concepts, methods and progress [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(4) : 441—446.
- [14] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5) : 607—613.
- OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5) : 607—613.
- [15] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式 [J]. *地理学报*, 2011, 66(12) : 1618—1630.
- LI S C, LIU J L, ZHANG C Y, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(12) : 1618—1630.

[16] 彭建, 王仰麟, 张源, 等. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应——以云南省永胜县为例 [J]. 地理学报, 2004, 59(4) : 629—638.

PENG J, WANG Y L, ZHANG Y, et al. Land use change and its ecological effect in the ecotone of northwest of Yunnan province, China: a case study of Yongsheng county [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4) : 629—638.

[17] 伍星, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 土地利用变化对长江上游生态系统服务价值的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(8) : 236—241.

WU X, SHEN Z Y, LIU R M, et al. Effect of land use change on ecosystem services value of the upper reaches of the Yangtze River [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25 (8) : 236 —241.

[18] 陈阳, 张建军, 杜国明, 等. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变 [J]. 生态学报, 2015, 35 (18) : 6517 —6164.

CHEN Y, ZHANG J J, DU G M, et al. Temporal and spatial changes in ecosystem service values in the Northern Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (18) : 6517 —6164.

[19] 程建, 程久苗, 吴九兴, 等. 2000 ~ 2010 年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6) : 894—901.

CHENG J, CHENG J M, WU J X, et al. Changes of land use and ecosystem service functions in Yangze river basin from 2000 to 2010 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(6) : 894—901.

[20] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(12) : 3311—3319.

LIU G L, ZHANG L C, ZHANG Q. Spatial and temporal dynamics of land use and its influence on ecosystem service value in Yangtze river delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12) : 3311—3319.

[21] 赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 2008 ~ 2016 年鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值的时空变化研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2) : 198—208.

ZHAO Z G, YU D, HAN C Y, et al. Study on the spatial and temporal changes in ecosystem services value in Poyang lake ecological economic zone from 2008 to 2016 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2) : 198—208.

[22] 李涛, 甘德欣, 杨知建, 等. 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 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(12) : 3787—3796.

LI T, GAN D X, YANG Z J, et al. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value of Dongting Lake area influenced by changes of land use. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12) : 3787—3796.

-
- [23] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 等. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力 [J]. 生态学报, 2014, 34(20) : 5962—5973.
- YAN E P, LIN H, WANG G X, et al. Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir region during 1990—2011 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20) : 5962—5973.
- [24] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应 [J]. 生态学报, 2013, 33(8) : 2565—2576.
- HU H B, LIU H Y, HAO J F, et al. Spatio-temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8) : 2565—2576.
- [25] 王飞, 高建恩, 邵辉, 等. 基于 GIS 的黄土高原生态系统服务价值对土地利用变化的响应及生态补偿 [J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1) : 25—31.
- WANG F, GAO J E, SHAO H, et al. Response of ecosystem service values to land use change based on GIS and ecological compensation in Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1) : 25—31.
- [26] CONSTANZA R, GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152—158.
- [27] ROLF W, LENZ R, PETERS D. Development of a quantitative ‘bioassay’ approach for ecosystem mapping. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management, 2012, 8: 71—79.
- [28] ERICKSEN P, DE LEEUW J, SAID M, et al. Mapping ecosystem services in the Ewaso Ng’iro catchment. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management, 2012, 8: 122—134.
- [29] SU S L, LI D L, HU Y N, et al. Spatially non-stationary response of ecosystem service value changes to urbanization in Shanghai, China [J]. Ecological Indicators, 2014, 45 (5) :332—339.
- [30] 熊鹰. 湖南省生态足迹与生态承载力的动态变化分析 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(10) : 1683—1688.
- XIONG Y. Dynamic changes of ecological footprint and ecological capacity in Hunan province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(10) : 1683—1688.
- [31] 中国科学院可持续发展研究组. 中国可持续发展研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- Research Group on sustainable development of the Chinese Academy of Sciences. Research on sustainable development of China [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [32] 李晖. 湖南农业持续发展的生存资源优度评价 [J]. 地理科学进展, 2000, 19(6) : 41—49.

LI H. Evaluation on Grades of Subsistent Resources for Sustainable Agricultural Development in Hunan Province [J]. Progress in Geography, 2000, 19(6) : 41-49.

[33] 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 G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2) : 189-196.

[34] 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) : 1243-1254.

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.

[35] 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 G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based Valuation method of ecosystem services in China [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5) : 911-919.

[36] 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.

XIE G D, XIAO Y, ZHEN L, et al. Study on ecosystem services value of food production in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3) : 10-13.

[37] FISCHER M M, GETIS A. Handbook of Applied Spatial Analysis:Software Tools, Methods and Applications [M]. Berlin:Springer, 2010.

[38] WANG W J, GUO H C, CHUAI X W, et al. The impact of land use change on the temporospatial variations of ecosystems services value in China and an optimized land use solution. Environmental Science & Policy, 2014, 44: 62-72.

[39] 湖南省人民政府. 湖南省土地利用总体规划(2006-2020) . http://www.hunan.gov.cn/zwgk/ghjh/fzgh/201312/t20131219_1009954.html, 2014-12-15.