

长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析

陈万旭^{1,2}, 李江风^{1,2}, 朱丽君^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074; 2. 国土资源部法律评价工程重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 生态系统功能的不断退化是人类当前面临的一个共同挑战, 是全球可持续发展研究的焦点问题。长江中游地区生态环境保护对于构建中国生态安全格局具有重要作用, 为了深入分析长江中游地区土地利用活动对生态系统功能的干扰程度, 基于长江中游地区生态系统服务价值评价结果, 采用土地利用变化生态贡献度和生态系统服务价值敏感性方法进行测度。研究表明: (1) 研究期间长江中游地区地均生态系统服务价值经历了“先增加后降低”的变化过程, 山区地均生态系统服务价值高于平原地区、城市群地区、大城市周边县区以及主要交通道路沿线地区, 长江中游地区生态系统服务价值总体变化呈现“两纵三横”的空间分布格局; (2) 1995-2015年间退耕还林、还水、还湿是长江中游地区生态系统改善的主要原因, 毁林开荒、围湖造田以及建设用地对林地和耕地的占用是长江中游地区生态系统恶化的主要原因; (3) 食物生产、原材料生产、气体调节、土壤保持和维持生物多样性等五种类型生态系统功能敏感性有所增加, 其他类型生态系统功能敏感性逐渐减弱。研究结果可为长江中游地区生态环境保护, 保障生态系统服务各项子功能的持续供给提供科学指导。

关键词: 生态系统服务价值; 空间分异; 敏感性; 长江中游地区

生态系统是人类生存发展所需要物质和非物质的重要来源^[1-2], 人类活动对生态系统的结构和功能造成了严重威胁^[3], 引发诸如生物多样性丧失、臭氧层破坏、全球变暖和土地荒漠化等一系列严重的全球性生态环境问题^[4-5]。随着中国经济的迅速发展和城镇化进程的不断推进, 社会经济发展进入深度转型时期, 生态、气候和人居环境等方面诸多负面效应日益凸显, 探索生态环境变化驱动机制, 打破生态环境桎梏, 是实现人类社会经济和生态环境协调发展的首要问题, 已成为政府部门与学术界关注的焦点。

“生态系统”概念是由 Ehrlich 等^[6]在 Carroll 等^[7]提出的“环境服务”概念以及 Walter^[8]提出的“自然服务”概念的基础上首次提出。生态系统服务概念的提出很好地将生态系统与人类发展系统联系起来。Costanza 等^[9]提出的生态系统服务价值分类及经济价值评估方法体系, 为生态系统服务价值研究提供了新的思路和方法, 把生态系统服务价值研究推向了一个新的高度, 自此之后生态系统服务价值在全球范围内得到了广泛的研究。中国学者谢高地等^[9]基于 700 多个生态学专家知识对生态系统服务价值分类及当量表进行修

收稿日期: 2018-06-29; 修订日期: 2018-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701629); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (CUG160819); 国土资源部法律评价工程重点实验室开放基金项目 (CUGFP-1704); 国家公益性行业科研专项 (201511004-4)

作者简介: 陈万旭 (1989-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 研究方向为资源环境、区域经济。

E-mail: cugcwx@sina.com

通讯作者: 李江风 (1957-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地利用规划、国土资源调查评价及地质公园规划。E-mail: jfli0524@163.com

正,生态系统服务分类由原来的Costanza等划分的17类型,修正为包括4个一级类型:供给服务、调节服务、支持服务和文化服务,9个二级类别:原材料生产、食物生产、气候调节、气体调节、废物处理、水文调节、维持生物多样性、保持土壤和提供美学景观,至此中国生态系统服务价值的相关研究进入了一个新的研究阶段。

地球表层系统是生态系统的重要载体,土地利用/覆被变化是地球表层系统中最突出的景观标志^[10]。千年生态系统评估报告(Millennium Ecosystem Assessment, MA)中指出19世纪50年代以来土地利用/覆被变化是导致陆地生态系统服务价值变化最重要的驱动力^[11]。土地利用变化通过改变区域资源、生物多样性和生态系统类型的空间分布来影响区域生态系统功能^[12]。以往研究主要集中于生态系统服务价值对土地利用/覆被变化的响应研究^[13-15]、生态系统子功能对土地利用变化的响应^[16]以及土地利用系统和生态服务系统之间的相互作用关系研究^[17],鲜见深入分析土地利用变化过程中各地类之间相互转换带来生态系统功能变化的相关研究。另一方面主要集中于对单一类型生态系统功能的研究,如依据单一生态系统服务价值评价结果对水土保持能力^[18-19]、生物多样性^[20]和土壤有机碳含量^[21]等方面进行评估的相关研究,但是很少有关于生态系统服务9种生态系统子功能的综合研究。还有一些研究从社会经济角度出发,探索社会经济因子对生态系统服务价值变化的影响^[22-23]。国内外研究普遍认为土地利用变化以及社会经济的发展会对生态系统产生严重影响,然而很少有研究从生态敏感性的角度来研究人类活动对生态系统的干扰程度。以往研究中学者们主要运用Mansfield提出的敏感性系数对生态环境敏感性进行研究^[24],也有学者提出了交叉敏感性系数来测度土地利用变化对生态系统服务价值变化每个过程的影响程度^[25-26],还有部分学者研究生态系统对气候变化^[27-28]、人类活动^[29]和土地利用强度^[26]的敏感性。但生态系统服务价值对土地利用综合动态度的敏感性研究较少,单一类型生态系统服务价值敏感性研究更是鲜见。单一类型生态系统服务敏感性研究能够更深层次地揭示人类活动对生态系统服务结构和功能的影响。就生态系统研究尺度而言,有全球尺度^[2,30]、国家尺度^[1,31]、省域尺度^[12,23]、地级市尺度^[12]、县域尺度^[31-32]、乡镇尺度^[33]和流域范围^[34-35]的研究,很少有城市群密集地区生态系统服务价值敏感性的相关研究。

本文基于1995年、2005年和2015年土地利用/覆被变化数据以及生态系统服务价值测度模型,对长江中游地区县域生态系统服务价值时空分异特征进行测度,并构建土地利用生态系统服务价值贡献度和生态系统服务价值敏感性测度方法,对长江中游地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应以及敏感性进行研究,以期对长江中游地区生态环境保护和制定差别化的生态环境管理政策提供科学借鉴。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

长江中游地区包括湖南省、湖北省、江西省三省(108°21'~118°28'E, 24°29'~33°20'N),是长江经济带和中部地区崛起等国家战略的重要组成部分(图1)。长江中游地区地形条件复杂,以丘陵山地为主,属北亚热带季风气候,四季分布均匀,热量充足,年温差较小,夏季高温多雨,冬季气温适中,雨量充沛,季节变化大。地理位置条件优越,承东启西、连接南北,交通便利,长江水系横穿境内,京广线、京九线、焦柳线、浙赣线、湘黔线、汉丹线铁路以及多条航空路线构成了完善的综合立体交通走廊。随着中部

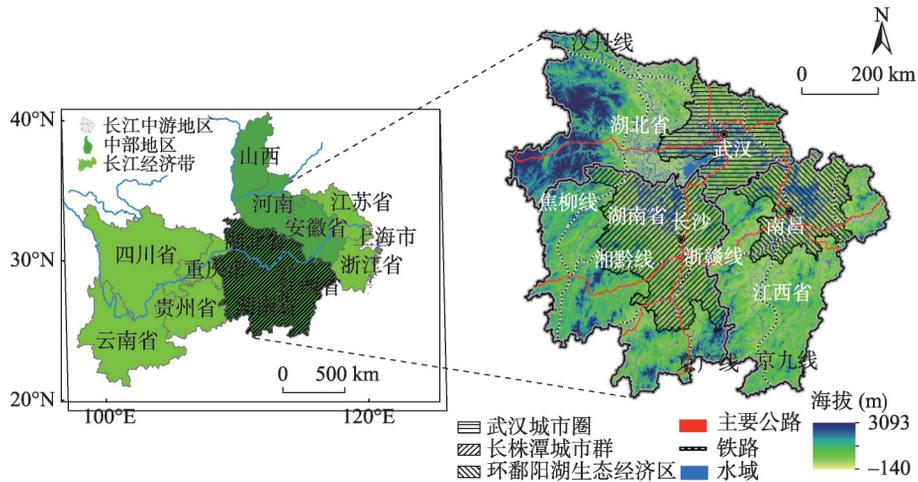


图1 长江中游地区区位图

Fig. 1 The location of the Middle Yangtze River region

崛起和长江经济带等国家战略的稳步实施,长江中游地区经济发展水平大大提高,成为中部崛起和长江经济带协调发展的重要中转点和接力点之一。产业结构由2000年的19.38 : 42.99 : 37.63调整为2015年的11.19 : 46.19 : 42.62,人均GDP由2000年的6003.90元增加到2015年的43706.67元,但仍低于2015年全国人均GDP 49868.75元,鄂西和湘西贫困落后县区仍然存在于长江中游地区。在快速的城镇化、工业化以及显著的区域发展不平衡背景下,1995-2015年间长江中游地区土地利用发生深刻转型,建设用地面积增加了6826.71 km²,耕地面积减少了5841.55 km²,林地面积减少了2295.84 km²,草地面积减少了1334.74 km²。土地利用变化对生态系统造成了严重干扰,识别长江中游地区生态敏感区域,为长江中游地区生态环境保护提供科学指导,对促进生态环境和社会经济协调发展有重要意义。

1.2 数据来源

土地利用数据来源于1995年、2005年和2015年各期Landsat TM/ETM遥感影像解译数据,空间分辨率为30 m×30 m。参照谢高地等生态系统服务价值地类分类体系,本文土地利用类型划分为7个一级类型:建设用地、林地、耕地、草地、湿地、河流湖泊和未利用地^[9]。粮食单产数据来源于1996-2016年份湖北省、湖南省和江西省统计年鉴,粮食价格数据来源于2016年《中国农产品价格调查年鉴》等统计资料。DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),各行政单元的行政界线、城市驻地、铁路和公路数据等基础地理信息数据来自国家基础地理信息中心1 : 400万数据库(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值测算

在Costanza等^[2]提出的生态系统服务价值理论方法的基础上,结合谢高地等^[9]根据中国实际情况建立的生态系统服务价值当量表(表1),构建长江中游地区生态系统服务价值测度模型。1个标准单位生态系统服务价值当量定义为1 hm²农田每年平均粮食产量经

济价值的1/7, 结合长江中游地区单位面积粮食产量和粮食平均价格, 计算出生态系统服务价值当量因子为2148.35元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。计算公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n (LUC_i \times VC_i) \quad (1)$$

$$AESV = \frac{\sum_{i=1}^n (LUC_i \times VC_i)}{\sum_{i=1}^n LUC_i} \quad (2)$$

$$C = \frac{AESV_{t_2} - AESV_{t_1}}{AESV_{t_1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ESV 是生态系统服务价值(元); $AESV$ 是地均生态系统服务价值(元/ hm^2), $AESV_{t_1}$ 和 $AESV_{t_2}$ 是 t_1 和 t_2 时地均生态系统服务价值(元/ hm^2); LUC_i 表征土地利用类型 i 的面积(hm^2); VC_i 是土地利用类型 i 的生态系统服务价值系数元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$); C 是地均生态系统服务价值变化率(%); n 是区域土地利用类型数量。

表1 2007年中国生态系统单位面积生态系统服务价值当量

Table 1 Equivalent value per unit area of ecosystem services in China in 2007		元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)					
一级类型	二级类型	林地	草地	耕地	湿地	河流/湖泊	未利用地
供给服务	食物生产	0.33	0.43	1.00	0.36	0.53	0.02
	原材料生产	2.98	0.36	0.39	0.24	0.35	0.04
调节服务	气体调节	4.32	1.50	0.72	2.41	0.51	0.06
	气候调节	4.07	1.56	0.97	13.55	2.06	0.13
	水文调节	4.09	1.52	0.77	13.44	18.77	0.07
	废物处理	1.72	1.32	1.39	14.40	14.85	0.26
支持服务	保持土壤	4.02	2.24	1.47	1.99	0.41	0.17
	维持生物多样性	4.51	1.87	1.02	3.69	3.43	0.40
文化服务	提供美学景观	2.08	0.87	0.17	4.69	4.44	0.24
	合计	28.12	11.67	7.90	54.77	45.35	1.39

注: 表1来源于文献[9]。

1.3.2 土地利用变化的生态贡献度

土地利用变化的生态系统服务价值贡献度是指 i 类土地利用类型转化为 j 类土地利用类型引起的区域生态系统服务价值变化率, 公式如下^[36]:

$$EL_{i-j} = \frac{(VC_j - VC_i) \times LUC_{i-j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(VC_j - VC_i) \times LUC_{i-j}]} \times 100\% \quad (4)$$

式中: EL_{i-j} 是土地利用变化对生态系统服务价值的贡献度; VC_j 和 VC_i 分别是土地利用类型 j 和 i 生态系统服务价值当量系数; LUC_{i-j} 是研究期间 i 类土地利用类型转为 j 类土地利用类型的面积。

1.3.3 生态系统服务价值敏感性分析

引入经济学的弹性分析模型来测度土地利用变化对生态系统服务价值的影响程度, 生态系统服务价值敏感性可以定义为生态系统服务价值变化率与土地利用综合动态度的

比值^[1,12,34]。其中土地利用综合动态指数侧重于土地利用变化的过程而不是土地利用变化的结果,计算过程在ArcGIS 10.3 (Arc Toolbox / Analysis Tools / Overlay / Intersect) 中实现,然后使用Excel (Pivot-Table) 处理得到土地利用综合动态度。公式如下:

$$SI = \left| \frac{(ESV_{t2} - ESV_{t1}) / ESV_{t1}}{ILUD} \right| \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

$$ILUD = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LUC_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LUC_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中: SI 是生态系统服务价值对土地利用变化的敏感度指数; ESV_{t2} 和 ESV_{t1} 分别是 $t1$ 和 $t2$ 时生态系统服务价值; $ILUD$ 是土地利用综合动态度; LUC_i 代表土地利用类型 i 的面积; ΔLUC_{i-j} 是 $t1$ 到 $t2$ 期间 i 地类转为 j 地类的面积。

2 结果分析

2.1 长江中游地区生态系统服务价值时空分布特点

根据式 (1) 和式 (2) 的测度结果,发现长江中游地区生态系统功能总体在恶化,局部在改善 (图2)。从时间尺度看,1995年、2005年和2015年长江中游地区地均生态系统服务价值分别是46244.29元/hm²、46484.08元/hm²和46249.25元/hm²,2005年长江中游地区生态系统功能有所改善,主要由于1989年实施的长江中上游防护林体系建设工程等绿化项目对长江中游地区生态系统的改善有重要作用。1995年、2005年和2015年生态系统功能子系统中水文调节功能最高,分别为4245.19亿元、4314.23亿元和4308.22亿元,同样处于先增加后降低的生态系统子功能类型还有原材料生产、气体调节、维持生物多样性和提供美学景观功能。粮食生产功能价值在所有子系统中最低,1995年、2005年和2015年分别为660.00亿元、658.18亿元和647.30亿元,同样处于持续降低的还有保持土壤功能。从空间尺度来看,长江中游地区地均生态系统服务价值空间分布相对较为稳定,地均生态系统服务价值高值区主要分布于湖北省西部的巫山和湖南省西部的雪峰山、湖南南部的南岭,江西东部的武夷山以及江西和湖南省之间的罗霄山;低值区主要分布于江汉平原、鄱阳湖平原和洞庭湖平原地区以及主要的交通道路沿线地区。地均生态系统服务价值最高的县市主要分布在沅江市等地区,最低的地区分布在江汉区。山地丘陵地区尤其是鄂西和湘西经济欠发达地区,交通落后,城镇化水平低,对生态系统扰动相对较弱;城市圈以及大城市周边县区是长江中游地区社会经济发展和人口的集聚地区,频繁的人类活动严重地影响了区域生态系统功能。

根据式 (3) 结果,从地均生态系统服务价值变化来看 (图3),1995-2005年间地均生态系统服务价值有显著提高的县区主要分布在湘西山区以及平原地区,2005-2015年间地均生态系统服务价值显著增加的区域转移到鄂西山区和江汉平原,生态系统功能降低区域主要集中于大城市周边县区 and 主要的交通道路沿线的县区。1995-2015年间地均生态系统服务价值降低幅度低于10%的县区呈“点状”分布,主要集中于武汉、长沙、南昌等主要地级市及道路交点县区,降低速度在1%~10%之间的县区主要沿交通道路呈“线

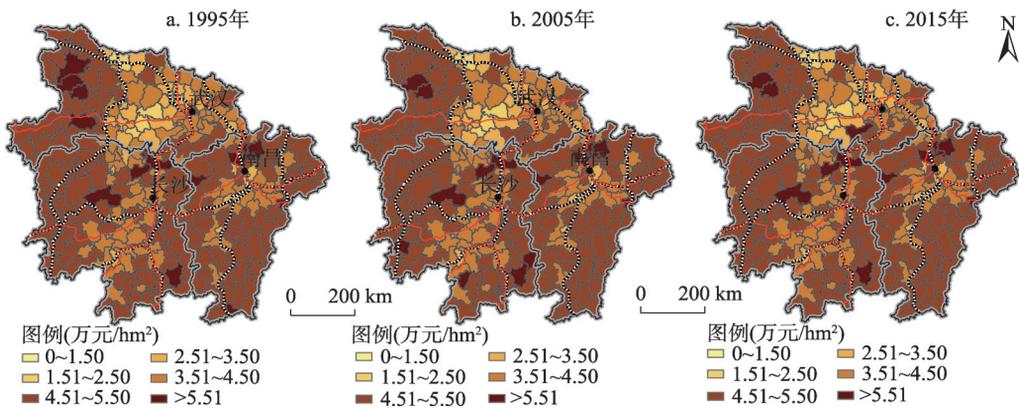


图2 1995-2015年长江中游地区地均生态系统服务价值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of *AESV* in the Middle Yangtze River region in 1995-2015

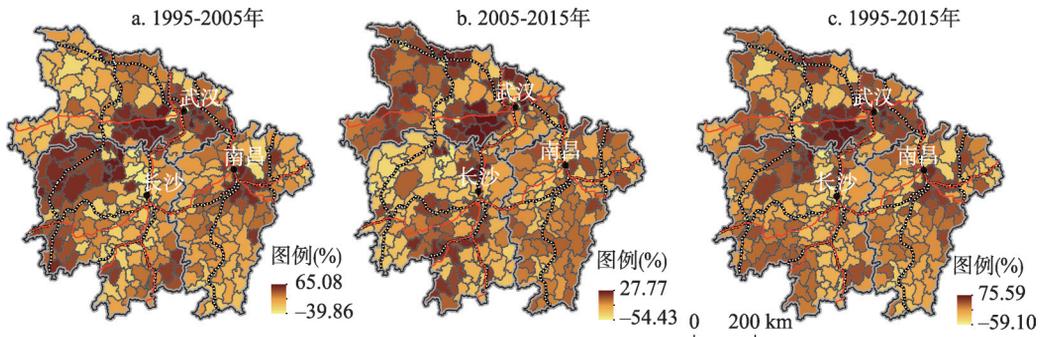


图3 1995-2015年长江中游地区地均生态系统服务价值变化率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the change rate of *AESV* in the Middle Yangtze River region in 1995-2015

状”分布，主要是分布在长江中游三省境内的京九线、京广线、湘黔线、浙赣线和汉丹线沿线的县区，其他地区呈现离散分布，并总体呈现“两横三纵”的空间分布特征。

2.2 长江中游地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应

1995年、2005年和2015年长江中游地区生态系统服务价值分别为26112.82亿元、26248.23亿元和26115.60亿元（表2），说明1995-2005年间长江中游地区生态系统服务价值有所增加，随后的10年间有所降低。林地对于长江中游地区生态系统服务价值贡献度最高，达到75%以上，在研究期间贡献度逐渐降低；其次耕地对长江中游地区生态系统服务价值的贡献度在11%以上，未利用地对长江中游地区生态系统服务价值的贡献度最低。土地利用活动会导致生态系统功能的恶化，同时也会引起生态系统功能的改善。为了深入揭示土地利用变化的生态环境效应过程，本文依据式（4）计算得出（表3），1995-2015年间耕地转为林地是区域生态系统功能改善的主要原因，退耕还林政策对于长江中游地区生态系统功能改善起了重要作用，贡献度超过了40%。其次耕地转为河流湖泊是区域生态系统功能提高的另外一个重要原因，贡献度超过了20%。土地利用过程中生态系统功能往往同时发生着改善和恶化两种相反趋势，毁林开荒是区域生态系统恶化的主要原因，在1995-2005年和2005-2015年间林地转为耕地对区域生态系统功能恶化贡

表2 1995-2015年长江中游地区各个地类生态系统服务价值及贡献率

Table 2 *ESV* and contribution rate of various land-use types in the Middle Yangtze River region in 1995-2015

地类	1995年 <i>ESV</i>	1995年贡献率	2005年 <i>ESV</i>	2005年贡献率	2015年 <i>ESV</i>	2015年贡献率
	/亿元	%	/亿元	%	/亿元	%
1	2987.62	11.44	2964.14	11.29	2888.47	11.06
2	19947.25	76.39	20013.48	76.25	19808.60	75.85
3	549.57	2.10	507.47	1.93	516.09	1.98
4	1995.15	7.64	2197.42	8.37	2172.91	8.32
6	0.28	0.00	0.23	0.00	0.29	0.00
7	632.94	2.42	565.48	2.15	729.24	2.79
合计	26112.82	100	26248.23	100	26115.60	100

注:其中1~7分别代表耕地、林地、草地、河流湖泊、建设用地、荒漠和湿地7种地类,下同。

表3 1995-2015年长江中游地区土地利用变化对生态系统服务价值的贡献度

Table 3 Contribution rate of land use and land cover change to *ESV* in the Middle Yangtze River region in 1995-2015

模式	1995-2005年			2005-2015年			1995-2015年		
	土地利用 转变类型	<i>ESV</i> 变化量 /亿元	贡献度 %	土地利用 转变类型	<i>ESV</i> 变化量 /亿元	贡献度 %	土地利用 转变类型	<i>ESV</i> 变化量 /亿元	贡献度 %
生态系统功能 改善	1→2	331.39	42.12	1→2	316.20	43.00	1→2	237.16	33.34
	1→4	205.61	26.13	1→4	177.23	24.10	1→4	234.64	32.99
	3→2	87.21	11.08	3→2	53.34	7.25	1→7	65.52	9.21
	1→7	54.091	6.87	1→7	43.11	5.86	3→2	64.14	9.02
	5→1	26.76	3.40	4→7	41.91	5.70	4→7	33.75	4.75
	合计	705.06	89.60	合计	631.80	85.93	合计	635.22	89.30
生态系统功能 恶化	2→1	-331.93	50.95	2→1	-336.22	38.74	2→1	-256.57	36.21
	4→1	-103.47	15.88	2→5	-131.79	15.18	2→5	-143.53	20.26
	7→4	-34.90	5.36	4→1	-122.74	14.14	1→5	-84.88	11.98
	2→3	-31.98	4.91	1→5	-85.30	9.83	4→1	-79.94	11.28
	2→5	-31.27	4.80	2→3	-76.36	8.80	2→3	-32.61	4.60
	合计	-533.55	81.90	合计	-752.41	86.69	合计	-597.53	84.34

注:1→2代表耕地转为林地,其他代码以此类推。

献率分别达到了50.95%和38.74%,围湖造田是1995-2005年间生态系统功能退化的另一重要原因,河流湖泊转为耕地对于区域生态系统服务价值的降低贡献了15.88%,2005-2015年建设对林地的占用为区域生态系统服务价值的降低贡献了15.18%。1995-2015年长江中游地区生态系统服务价值总体变化不显著,主要是由于生态系统服务价值的增加和降低这两种趋势在同时发生,在一定区域内相互抵消,长江中游地区生态系统服务价值总体上维持相对稳定状态,但是并不意味着区域生态系统功能没有发生变化。

2.3 长江中游地区生态系统服务价值敏感性分析

根据式(6)分别计算得出1995-2005年和2005-2015年间长江中游地区土地利用综合动态度,结合式(5)分别测度长江中游地区生态系统服务功能和9种类型生态系统子功能对土地利用综合动态度的敏感性。生态系统服务功能及各项子功能对土地利用综合动态度的敏感性空间分布规律性不是特别显著,但总体可以发现平原地区、城市群地

区、武汉、长沙和南昌等大城市周边县区以及主要交通道路沿线地区,生态系统服务功能及各项生态系统子功能的敏感性较高。也就是说这些地区生态系统功能容易受到土地利用活动的影响,具体各个生态系统子功能对于土地利用活动敏感性空间分布有所差别。研究期间长江中游地区生态系统功能以及气候调节、水文调节、废物处理和提供美学景观等生态系统服务子功能对土地利用活动敏感性有所降低,说明土地利用活动对生态系统功能和这4种生态系统子功能的影响在逐渐减弱;食物生产、原材料生产、气体调节、土壤保持和维持生物多样性等生态系统子功能对土地利用活动敏感性有所增加,说明土地利用活动对这5种生态系统子功能干扰有所增强。长江中游地区作为中国重要的粮食主产区,需要加强耕地保护,保证生态系统食物生产功能的持续供给,进而保障粮食安全;另外长江中游地区是中国重要的水源涵养区,需要通过退田还湖以及建立湿地保护区等生态恢复措施,保护湿地,加强水土保持建设,增强气候调节功能。同时城市建设用地扩张以及道路等基础设施的建设对维护生物多样性造成了严重威胁,导致维持生物多样性功能敏感性逐渐增加。具体来说,1995-2005年和2005-2015年间长江中游地区生态系统服务价值敏感性分别为0.18%和0.15%(图4a、图4b),意味着在1995-2005年和2005-2015年两个时段土地利用综合动态度每增加1%,分别会导致长江中游地区生态系统服务价值波动0.18%和0.15%。1995-2015年间粮食生产功能生态敏感性较高的县区主要集中在鄂西地区,随后10年逐渐转移到湖北省中部地区(图4c、图4d)。原材料生产功能和气体调节功能敏感性空间分布较为一致,鄂西和湘西地区原材料生产和气体调节这两种功能对于土地利用活动敏感性较高(图4e~图4h)。1995-2005年和2005-2015年间长江中游地区气候调节功能敏感性有所降低,分别为0.06%和0.01%,平原地区以及河流湖泊和湿地集中地区气候调节功能敏感性明显高于其他地区(图4i、图4j)。水文调节功能敏感性也有显著降低,平原地区和交通道路沿线地区水文调节敏感性高于其他地区(图4k、图4l)。1995-2005年到2005-2015年间保持土壤功能对于土地利用活动敏感性从0.03%增加到0.30%,土地利用活动对于土壤功能影响越来越显著,防洪能力和各土地类型的滞洪蓄洪和水土保持功能密切相关,长江中游地区洪涝灾害频发,提高水土保持功能十分必要。1995-2005年和2005-2015年间长江中游地区提供美学景观功能敏感性分别为0.83%和0.24%,大城市及周边地区土地利用活动对土地提供美学景观功能影响较大(图4s、图4t)。

3 结论与讨论

基于生态系统服务价值理论研究框架,本文对长江中游地区生态系统服务价值进行测度,采用土地利用变化生态贡献度和生态敏感性测度方法,对长江中游地区土地利用变化过程中地类变化引起的生态系统服务价值波动进行深入探索,并且分析了长江中游地区生态系统服务价值敏感性的时空分布特征。结果如下:

(1) 1995年、2005年和2015年长江中游地区生态系统服务价值分别为26112.82亿元、26248.23亿元和26115.60亿元,地均生态系统服务价值低值区主要分布在江汉平原、鄱阳湖平原和洞庭湖平原,尤其是大城市及周边县区和重要的交通道路沿线县区。地均生态系统服务价值高值区主要分布在湖北北部的大别山南侧和西部的巫

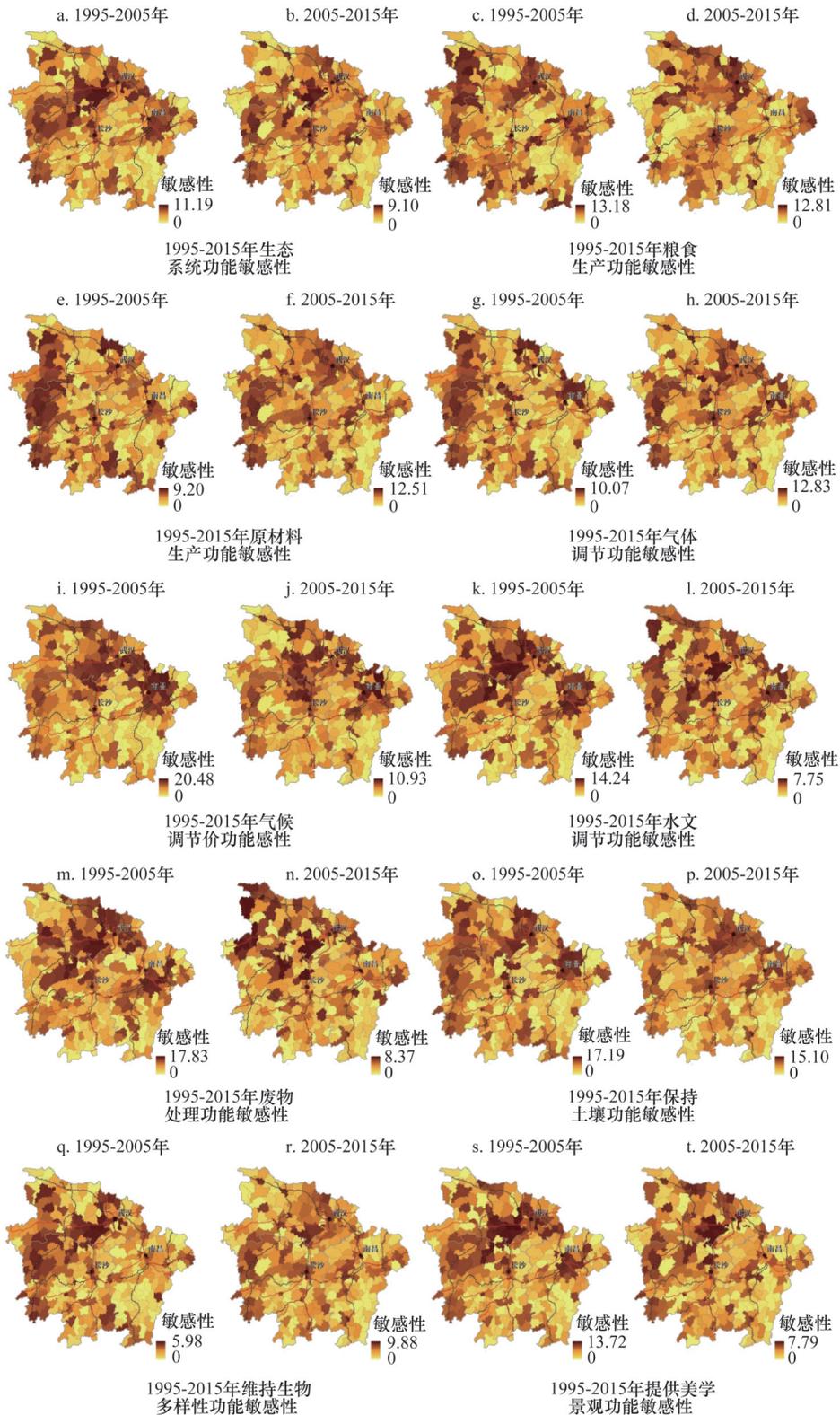


图4 1995-2015年长江中游地区生态系统服务价值敏感性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of *ESIV* sensitivity in the Middle Yangtze River region in 1995-2015

山、湖南省西部的雪峰山和南部的南岭、江西省东部的武夷山以及江西省和湖南省之间的罗霄山等山区。

(2) 林地和耕地对长江中游地区生态系统服务价值贡献度达到了80%以上, 未利用地生态贡献度最低。长江中游地区生态系统功能改善的主要原因是退耕还林, 耕地转为林地对区域生态系统服务价值增加贡献度超过了40%, 其次耕地转为河流湖泊对区域生态系统服务价值增加贡献度超过了20%。长江中游地区生态系统功能恶化的主要原因是毁林开荒, 在1995-2005年和2005-2015年间林地转为耕地对于区域生态系统服务价值降低分别贡献了50.95%和38.74%, 同时围湖造田、建设用地占用耕地和林地同样也是导致生态系统功能恶化的重要原因。

(3) 长江中游地区平原地区、城市群地区、武汉、长沙和南昌等大城市周边县区以及主要交通道路沿线地区, 生态系统及生态服务系统子系统敏感性较高。生态系统功能、气候调节、水文调节、废物处理和提供美学景观功能对土地利用活动的敏感性有所降低, 食物生产、原材料生产、气体调节、土壤保持和维持生物多样性功能对土地利用活动的敏感性有所增加。

长江中游地区生态环境保护对于构筑区域生态屏障, 促进城市群绿色发展, 形成人与自然和谐发展格局具有重要意义。因此需要加强对长江中游地区生态环境的保护工作, 具体措施建议如下:

(1) 武汉城市圈和长株潭城市群地区是“两型社会”先行区, 也是湖北省和湖南省的经济集聚区, 而该地区地均生态系统服务价值较低, 生态环境问题异常严峻, 应该把生态环境保护目标作为其社会经济约束条件, 并纳入各级行政管理机构的绩效考核体系中; 同时这些地区也是生态系统服务敏感区, 应该结合城市群地区生态系统功能空间分布格局, 构建社会经济发展与生态环境协调度的评估体系, 完善城市群地区生态敏感区人口、资源环境动态监控机制。环鄱阳湖生态经济区是中国低碳经济发展先行区, 同样也是生态系统服务价值低值区和生态敏感区, 湖泊水环境污染、湿地植被多样性退化和水土流失是该区域可持续发展面临的严重问题, 因此积极退耕还湖, 提高河流湖泊系统的水源涵养、水土保持与废物处理生态功能十分必要。

(2) 划定城市永久开发边界线和生态管控红线, 将生态用地融入土地利用分类体系, 明确生态用地管理措施, 严格控制建设用地占用林地和耕地。加大保护自然生态系统力度, 提高生态系统自我修复能力, 重建可持续人工生态系统, 提高生物多样性功能, 维持城市生态平衡。加强土地整治工程和高标准农田建设工程建设, 落实耕地数量—质量—生态“三位一体”保护制度, 完善生态补偿机制和环境约束政策, 探索人类社会经济活动与自然生态系统协调可持续发展路径, 保障生态系统各项功能的持续供给。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, et al. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277

- (5325): 494-499.
- [4] RIND D. Complexity and climate. *Science*, 1999, 284(5411): 105-107.
- [5] 后立胜, 蔡运龙. 土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述. *地理科学进展*, 2004, 23(6): 96-104. [HOU L S, CAI Y L. An essential analysis and review on land use/cover change research. *Progress in Geography*, 2004, 23(6): 96-104.]
- [6] EHRlich P R, EHRlich A H. *Extinction: The Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. New York, NY, USA: Random House, 1981.
- [7] CARROLL M, WILSON W H M. *Man's Impact on the Global Environment*. Cambridge, UK: MIT Press, 1970.
- [8] WALTER E. W. How much ere nature's services worth. *Science*, 1999, 284(5411): 105-107.
- [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. *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. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [10] LAMBIN E F, TURNER B L, GEIST H J, et al. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, 11(4): 261-269.
- [11] REID W V, MOONEY H A, CROPPER A, et al. *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington DC: Island Press, 2005.
- [12] HAN Z, SONG W, DENG X Z. Responses of ecosystem service to land use change in Qinghai province. *Energies*, 2016, 9(4): 303.
- [13] 史洋洋, 吕晓, 黄贤金, 等. 江苏沿海地区耕地利用转型及其生态系统服务价值变化响应. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 961-976. [SHI Y Y, LYU X, HUANG X J, et al. Arable land use transitions and its response of ecosystem services value change in Jiangsu coastal areas. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 961-976.]
- [14] LI Y F, ZHAN J Y, LIU Y, et al. Response of ecosystem services to land use and cover change: A case study in Chengdu city. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 291-300.
- [15] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 等. 西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 543-555. [HUANG L, CAO W, WU D, et al. The temporal and spatial variations of ecological services in the Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 543-555.]
- [16] LUISA MARTINEZ M, PEREZ-MAQUEO O, VAZQUEZ G, et al. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(9): 1856-1863.
- [17] METZGER M J, ROUNSEVELL M, ACOSTA-MICHLIK L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1): 69-85.
- [18] 陈彧, 李江风, 徐佳. 基于GWR的湖北省社会经济因素对生态服务价值的影响. *中国土地科学*, 2015, 29(6): 89-96. [CHEN Y, LI J F, XU J. The impact of socioeconomic factors on ecological service value in Hubei province: A geographically weighted regression approach. *China Land Science*, 2015, 29(6): 89-96.]
- [19] 盛莉, 金艳, 黄敬峰. 中国水土保持生态服务功能价值估算及其空间分布. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1105-1113. [SHENG L, JIN Y, HUANG J F. Value estimation of conserving water and soil of ecosystem in China. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(7): 1105-1113.]
- [20] PLEXIDA S, SOLOMOU A, POIRAZIDIS K, et al. Factors affecting biodiversity in agrosylvopastoral ecosystems with in the Mediterranean Basin: A systematic review. *Journal of Arid Environments*, 2018, 151: 125-133.
- [21] XIONG X, GRUNWALD S, MYERS D B, et al. Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 974-982.
- [22] 唐秀美, 郝星耀, 刘玉, 等. 生态系统服务价值驱动因素与空间异质性分析. *农业机械学报*. 2016, 47(5): 336-342. [TANG X M, HAO X Y, LIU Y, et al. Driving factors and spatial heterogeneity analysis of ecosystem services value. *Transactions of the CSAM*, 2016, 47(5): 336-342.]
- [23] 姚成胜, 朱鹤健, 吕晞, 等. 土地利用变化的社会经济驱动因子对福建生态系统服务价值的影响. *自然资源学报*,

- 2009, 24(2): 225-233. [YAO C S, ZHU H J, LYU X, et al. Study on the impact of socioeconomic driving factors of land use change on the ecosystem service values in Fujian province. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2): 225-233.]
- [24] MANSFIELD E. *Microeconomics: Theory and Applications*, 4th Edition. New York, NY, USA: W. W. Norton, 1982.
- [25] KREUTER U P, HARRIS H G, MATLOCK M D, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 333-346.
- [26] 普拉提·莫合塔尔, 海米提·依米提. 土地利用变化下的生态系统服务敏感性研究: 以克里雅绿洲为例. *自然资源学报*, 2014, 29(11): 1849-1858. [POLAT M, HAMID Y. Ecosystem services sensitivity to land-use change: A case study of the Keriya Oasis. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(11): 1849-1858.]
- [27] BERGENGREN J C, WALISER D E, YUNG Y L. Ecological sensitivity: A biospheric view of climate change. *Climatic Change*, 2011, 107: 433-457.
- [28] CRAMER W. Advanced terrestrial ecosystem analysis and modelling. *Regional Environmental Change*, 2008, 8(3): 89-90.
- [29] JAGTAP T G, KOMARPANT D S, RODRIGUES R S. Status of a seagrass ecosystem: An ecologically sensitive wetland habitat from India. *Wetlands*, 2003, 23(1): 161-170.
- [30] GROOT R D, BRANDER L, PLOEG S V D, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50-61.
- [31] LI G D, FANG C L, WANG S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hot-spots in China. *Science of the Total Environment*, 2016, 545-546: 609-620.
- [32] LYU X, SHI Y Y, CHEN C, et al. Monitoring cropland transition and its impact on ecosystem services value in developed regions of China: A case study of Jiangsu province. *Land Use Policy*, 2017, 69: 25-40.
- [33] HU X S, HONG W, QIU R Z, et al. Geographic variations of ecosystem service intensity in Fuzhou city, China. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 215-226.
- [34] GONG J, LI J Y, YANG J X, et al. Land use and land cover change in the Qinghai Lake region of the Tibetan Plateau and its impact on ecosystem services. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(7): 818.
- [35] 姜翠红, 李广泳, 程滔, 等. 青海湖流域生态服务价值时空格局变化及其影响因子研究. *资源科学*, 2016, 38(8): 1572-1584. [JIANG C H, LI G Y, CHENG T, et al. Spatial-temporal pattern variation and impact factors of ecosystem service values in the Qinghai Lake Watershed. *Resources Science*, 2016, 38(8): 1572-1584.]
- [36] YI L, ZHANG Z X, ZHAO X L, et al. Have changes to unused land in China improved or exacerbated its environmental quality in the past three decades?. *Sustainability*, 2016, (8): 184.

Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River region

CHEN Wan-xu^{1,2}, LI Jiang-feng^{1,2}, ZHU Li-jun^{1,2}

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Legal Assessment Project, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China)

Abstract: The continuous degradation of ecosystem services is a common challenge facing human-beings, and it is the focus of global sustainable development research. The ecological environmental protection in the Middle Yangtze River region is of great significance to the construction of ecological security pattern in China. In order to deeply analyze the interference degree of land use activities to ecosystem services value (*ESV*) in the Middle Yangtze River region, it is necessary to evaluate the spatial-temporal distribution of *ESV* and the sensitivity of ecosystem services to land use change in the study region. Based on the evaluation results of *ESV* in the Middle Yangtze River region, this paper constructed the ecological contribution model of land use change and ecosystem services sensitivity model. The results showed that: (1) The average ecosystem service value (*AESV*) in this region in the years of 1995, 2005 and 2015 was 46244.29 yuan/hm², 46484.08 yuan/hm², and 46249.254 yuan/hm², respectively, and the study region experienced a "first increase and then decrease" change process. The counties with higher *AESV* were mainly located in the mountainous areas; plain areas, urban agglomeration areas, Wuhan, Changsha, and Nanchang, and major traffic routes tended to have lower *AESV*; the *ESV* change rate presented a spatial pattern of "two horizontal and three vertical" distribution. (2) The conversion of cultivated land to forest land and cultivated land to water areas during 1995-2015 were the key factors for the improvement of regional *ESV*, and their ecological contribution degrees were 33.34% and 32.99%, respectively; forest land converted to cultivated land, forest land converted to construction land and cultivated land converted to construction land were important causes that induced the deterioration of the regional ecological environmental quality, and their ecological contribution degrees were 36.21%, 20.26% and 11.98%, respectively. (3) The ecosystem services sensitivity areas were mainly distributed in areas with frequent human activities, 1% increase in the integrated land use dynamics would result in 0.18% and 0.15% fluctuation in *ESV* in the Middle Yangtze River region during the periods of 1995-2005 and 2005-2015, respectively; the ecological sensitivity of food production, raw material production, gas regulation, soil conservation and maintenance of biological diversity increased, and the sensitivity of other ecosystem function gradually weakened during the two study periods. The results of this study can provide scientific implications for the ecological environmental protection and the continuous supply of various sub-functions of the ecosystem services in the Middle Yangtze River region.

Keywords: ecosystem services value; spatial heterogeneity; sensitivity; Middle Yangtze River region