

DOI: 10.5846/stxb202003050413

丁梦婷, 裴凤松, 胡引翠, 董硕, 张征南, 刘泽鹏. 基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值时空变化特征研究. 生态学报, 2020, 40(19): 6801-6811.
Ding M T, Pei F S, Hu Y C, Dong S, Zhang Z N, Liu Z P. Spatial and temporal changes of ecosystem service value in Jiangsu Province based on LUCC. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6801-6811.

基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值时空变化特征研究

丁梦婷^{1,2,3}, 裴凤松⁴, 胡引翠^{1,2,3,*}, 董硕⁵, 张征南^{1,2,3}, 刘泽鹏^{1,2,3}

1 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050024

2 河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 石家庄 050024

3 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024

4 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116

5 河北师范大学旅游系, 石家庄 050024

摘要:江苏省作为资源环境容量有限但经济发展迅速的典型代表,在可持续发展背景下,开展土地利用变化、生态系统服务变化及其价值时空变化的研究,以期为缩小区域经济差异进行科学土地整治提供理论依据。首先基于 1995—2015 年间研究区经济发展重要时间节点的土地利用/覆被变化(LUCC)数据分析土地利用变化情况,然后引入评估计分理论动态研究生态系统服务变化,最后通过修正当量因子计算生态系统服务价值并应用空间自相关与热点分析方法研究其时空变化特征。结果表明:(1)耕地、建设用地和水体为研究区主要土地利用类型,总覆盖度达到 90%以上;2005—2015 年土地利用变化速度显著;苏南地区土地利用较为丰富。(2)对比各景观类型,森林是具有更多功能的生态系统;2015 年功能属性总得分高于 1995 年,但生态功能得分由 5 分降至 2 分。(3)1995—2015 年江苏省生态系统服务价值从 1258.19 亿元减少为 1208.74 亿元,苏南地区生态系统服务价值变化较大。据预测至 2022 年,生态系统服务价值会跌到 1.35 亿元。

关键词:土地利用变化;评估计分理论;生态系统服务价值;江苏省

Spatial and temporal changes of ecosystem service value in Jiangsu Province based on LUCC

DING Mengting^{1,2,3}, PEI Fengsong⁴, HU Yincui^{1,2,3,*}, DONG Shuo⁵, ZHANG Zhengnan^{1,2,3}, LIU Zepeng^{1,2,3}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

2 Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Shijiazhuang 050024, China

3 Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China

4 School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

5 Department of Tourism, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

Abstract: Jiangsu province has low resources and environmental capacity, but its economy is developing rapidly. Carrying out change research on land use, ecosystem service and ecosystem service value in time and space, under the background of sustainable development, can provide theoretical basis for opening scientific land improvement to reduce regional economic differences. First of all, analysis of land use change situation based on 1995—2015 economic development important time of the node in the study area of land use/cover change (LUCC) data, then introduce assessment and scoring theory to dynamically study changes in ecosystem services, at last, by modified equivalent factor calculation value of ecosystem

基金项目:国家社科基金项目(15BJY026)

收稿日期:2020-03-05; 网络出版日期:2020-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huiyincui@163.com

services and application of spatial autocorrelation analysis method to study the change of ecosystem service value in time and space with the hot spot. The results show that: (1) cultivated land, construction land and water are the main land use types in the study area, and the total coverage is more than 90%; 2005—2015 has rapid land use change and the land use in southern part of Jiangsu is rich. (2) compared with different landscape types, forest is an ecosystem with more functions; In 2015, the total score of functional attributes was higher than that of 1995, but the ecological function score decreased from 5 to 2 points. (3) Ecosystem services value in Jiangsu Province decreased from 125.189 billion yuan to 120.874 billion yuan and that in southern Jiangsu changed greatly from 1995—2015. It is predicted that by 2022, ESV will fall to 135 million yuan; the value of ecosystem services in southern Jiangsu has changed significantly.

Key Words: land use change; scoring method; ecosystem service value; Jiangsu Province

生态系统服务是生态系统所形成及维持人类赖以生存的自然环境条件与效用,人类可从中直接或间接获得生命支持的产品和服务^[1-2],生物多样性是衡量生态系统服务重要的先决条件^[3]。土地利用/覆盖变化(LUCC)和气候改变的综合作用是生物多样性减少的重要驱动力^[4]。土地利用/覆盖变化作为自然生态系统的载体,不仅会降低生态系统的调节能力(如,规避风险,最小化伤害等)^[5],还能影响土地生产力,造成土地退化、水污染等一系列不良后果^[6]。因此,基于长期土地利用/覆盖变化对生态系统服务进行定量研究,有助于指导人类活动、制止和扭转土地退化以及遏制生物多样性的丧失。

目前对生态系统服务价值的评估研究是生态经济学、地理学等相关学科研究的热点问题之一,在建设规划生态屏障、划分生态保护红线和协调生态经济中发挥重要的作用^[7-8]。1997年 Costanza 等基于均衡价值理论以及效应价值理论,制定了全球生态系统服务价值当量因子表^[1]。国内学者欧阳志云等^[9]基于 Costanza 的研究结果评估了中国陆地生态系统服务功能。谢高地基于中国国情通过生物量参数对当量因子表进行多次修正,制定出“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”^[10-11],为我国学者研究区域生态系统服务价值提供了计算基础,并在国内得到广泛应用^[12-14]。

江苏省人均国土面积最少但综合发展水平最高。目前对江苏省生态系统服务价值的研究较少且主要关注于特定区域,如刘洋等^[15]以太湖流域为例研究生态系统服务权衡与协同关系;韩炜^[16]以无锡为例研究土地利用变化及生态系统服务价值;于森等^[17]以江苏省沿海地区为例研究土地利用变化及其生态效应。但在可持续发展理念下,对于资源环境容量有限但经济发展迅速的典型代表江苏省来说,土地利用变化有哪些表现?其生态系统服务有哪些变化以及生态系统服务价值演变具有哪些特征?这一科学问题还没精准回答。因此,本研究利用 1995—2015 年研究区经济发展重要时间节点的 LUCC,计算土地利用动态度及香浓多样性指数;引入评估计分理论^[3,18-19],动态研究生态系统服务变化;通过修正当量因子计算生态系统服务价值,并应用空间自相关与热点分析方法研究其时空变化特征,以期江苏省在缩小区域经济差异进行土地整治过程中科学规划土地、协同经济发展与生态文明建设提供理论依据。

1 研究区域

江苏省位于我国东部沿海中心,位于 116°18'E—121°57'E, 30°45'N—35°20'N,处于亚热带向暖温带过渡地带,气候四季分明,雨量适中,地势低平,以平原为主。全省境内河渠纵横、水网稠密,长江横穿其南部,大运河纵贯南北,海岸线长 954km。经济综合竞争力领先全国,2019 年粮食产量占全国 5.58%,地区生产总值占全国 10.06%,人均地区生产总值高于全国水平。但省内区域发展不平衡,经济实力由南至北递减,2019 年苏南(南京、苏州、无锡、常州、镇江)、苏中(南通、扬州、泰州)和苏北(徐州、淮安、盐城、宿迁、连云港)人均地区生产总值分别为:160747、115360、70369 元。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

土地利用数据来源于中国科学院资源与环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=264>), 该土地利用数据集以 Landsat 遥感影像数据为信息源, 分辨率为 1km, 借助 ENVI 5.4.1 对其进行精度检验, 得到每期影像的总体分类精度在 93% 左右; 五期土地利用数据选择依据为江苏省经济发展的重要时间节点: 1995 年全省经济体制改革, 2000 年为“九五”计划的最后一年, 2005 年进入城乡统筹与区域共同发展阶段, 2010 年江苏省成为全国创新能力最强的地区, 2015 年启动“三一一”省级重大工程推进计划。统计数据采用《江苏省统计年鉴》、《全国农产品收益资料汇编》和江苏省粮食和物质储备局 (<http://lsj.jiangsu.gov.cn/col/col74735/index.html>), 收集 1995—2015 年江苏省粮食作物产量、种植面积、平均交易价格等资料, 整理后为生态系统服务价值计算的数据源。降水数据与土壤保持量数据来源于中国科学院资源与环境数据中心, NPP 数据采用陈鹏飞^[20]逐月净初级生产力栅格数据集成果, 分辨率为 1km。此外, 本文参考了国家统计数据、遥感影像和文献资料等其他数据。

2.2 土地利用分析方法

2.2.1 土地利用动态度

土地利用类型的变化幅度通常用单一土地利用动态度表示, 以衡量研究区某种土地利用类型变化速度的大小, 对土地利用/覆盖变化时间和区域差异分析具有重要意义^[21]。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中, K 为研究时段内某一土地利用类型的动态度; U_b 为研究期末某一土地利用类型面积; U_a 为研究期初的面积; T 为研究周期。注, 当 T 单位为年时, K 为某种土地利用类型的年均变化率。

2.2.2 香浓多样性指数 (SHDI)

为了深入分析土地利用情况以及联系生态系统服务变化研究, 本研究利用土地利用景观指数中香浓多样性指数 (SHDI), 结合其生态学意义探索土地利用景观斑块的演变特征。SHDI 对景观中各拼块类型非均衡分布状况较为敏感, 其值越大, 表明土地利用越丰富, 破碎化程度越高, 不定性的信息含量大。SHDI 模型如下:

$$SHDI = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, P_i 为研究区景观斑块类型 i 所占的比率; n 为研究区景观中斑块类型的数量。计算出的 $SHDI \geq 0$ 。

2.3 生态系统服务变化研究方法

本研究引入一种被广泛应用于对复杂系统的评估计分理论^[3,18-19], 来全面地描述生态系统服务的变化情况。研究中将生态系统提供的四种服务 (支持服务、调节服务、供给服务和文化服务) 纳入景观功能的三种类别 (生态、生产和文化), 且在每种景观功能中选取四个特征作为研究指标。以 1995 年为基准来研究区内生态系统服务的变化^[22-24], 每种功能的得分都在 -2—2 之间, 其中 2 表示强烈增强了功能属性, 1 表示轻微增强了功能属性, 0 表示对功能属性没有影响, -1 表示轻微影响了功能属性, -2 表示强烈影响了功能属性。每个指标最多得到 8 分, 理论上每种土地利用类型的景观功能得分最大值为 24。本研究选取 1995 年和 2015 年两个时间点来分析生态系统服务的变化, 且利用统计图表来直观表达土地利用类型的得分情况 (列高) 与面积占比份额 (带宽)。在本文研究中, 筛选出景观特征覆盖率大于等于 1% 的增长率的景观类型, 但是所有的景观类型其得分情况信息被保留在功能表中。

2.4 生态系统服务价值研究

2.4.1 生态系统服务价值计算

本文参考谢高地等人^[10]提出的基于单位面积价值当量因子的方法, 基于修订的“中国陆地生态系统单

位面积生态服务价值当量表”^[11],结合江苏省实际生产能力,采用粮食产量修正方法^[25]对其进行修改。具体修正过程如下:选取小麦、棉花和油菜籽作为主要粮食作物种类,通过查阅 1995—2015 年《江苏省统计年鉴》与江苏省粮食和物质储备局,得到江苏省 1995—2015 年三种粮食作物产量、播种面积以及江苏省 1995—2015 各年粮食价格,根据公式(3),最终得出江苏省单个生态系统当量的价值为 894.67 元/hm²。由于建设用地主要提供文化服务并且构建价值当量因子时缺失科学数据(例如土壤保持时空调节因子受下垫面以及各种人工表面的影响难以确定)以及未利用地端异质性且占有面积较少大约 0.2%,故在计算生态系统服务价值时将其排除,其中参与计算的土地利用类型覆盖研究区将近 90%的面积。根据各种土地利用类型的对应值,乘单个当量因子价值,得到江苏省各土地利用类型的单位面积生态系统服务价值(表 1)。

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (3)$$

式中, E_a 为 1hm²生态系统服务价值当量因子的经济价值(元/hm²); i 为研究区粮食作物的种类; n 为研究区主要粮食作物的总类别数; m_i 为研究区第 i 种粮食作物播种的总面积; p_i 为研究区第 i 种粮食作物的平均价格; q_i 为研究区第 i 种粮食作物面积单位平均产量; M 为研究区所有粮食作物的总播种面积。

2.4.2 敏感性分析

由于本文采用的基于当量因子计算生态系统服务价值的计算方法中,价值系数的确定对其计算的准确性相当关键。尽管与基于物质的量^[11](利用 NPP 数据、降水数据与土壤保持数据)计算出生态系统服务价值差值比小于 5%,但为了使结果更科学减少不确定性,引入敏感性指数(Coefficient of Sensitivity, CS)指随着时间变化,价值指数对生态服务价值的影响程度^[26-27]验证价值系数对生态服务价值计算的影响。公式^[28]如下:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(e_{jk} - e_{ik}) / e_{ik}} \right| \quad (4)$$

式中, CS 为敏感性指数; ESV 为生态系统服务价值总量, e 为 ESV 系数; i 、 j 分别表示初始价值系数和调整后的价值系数; k 为土地利用类型。

表 1 江苏省单位面积生态系统服务价值当量表/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 1 Ecosystem service value equivalent per unit area of Jiangsu Province

服务类型 Service type	水体 Water	林地 Forest	草地 Meadows	耕地 Arable land	
				旱地 Dry land	水田 Paddy field
调节服务 Regulating services	气候调节 1843.02	3641.30	1395.68	867.83	1163.07
	气体调节 456.28	3864.96	1342.00	644.16	966.24
	涵养水源 16810.81	3659.19	1359.89	688.89	1102.23
供给服务 Provisioning services	食物生产 474.17	295.24	384.71	894.67	1342.00
	原料生产 313.13	2666.11	322.08	348.92	315.82
支持服务 Supporting services	土壤保持 366.81	3596.56	2004.06	1315.16	1780.39
	生物多样性 3068.71	4034.95	1673.03	912.56	3301.32
文化服务 Cultural services	娱乐和旅游 3972.32	1860.91	375.76	152.09	4231.7

2.4.3 生态系统服务价值空间分布特征

本研究采用全局空间自相关 Global Moran's I 指数来反映生态系统服务价值的空间异质性。当 Moran's I > 0 时,值越大表明其空间正相关性越强; Z-Score > 1.96 时,值越大表明其空间正相关越显著;当 Moran's I = 0 时,表示其空间随机;当 Moran's I < 0 时,值越小,空间负相关性越强,空间差异性越大。公式为^[29]:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - x_a) (x_j - x_a)}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_a)^2} \quad (5)$$

式中, I 为莫兰指数; x_i 和 x_j 分别是第 i 个评价单元和第 j 个 ESV 评价单元的观测值; W_{ij} 为单元 i 和 j 单元之间的空间权重矩阵; \bar{x}_a 为观测值的平均值; n 为样本量, 即研究区某一尺度上 ESV 评价单元的总个数。

为进一步研究生态系统服务变化量在空间上的局部表现, 使用 Hot Spot Analysis 的 Getis-Ord G^* 指数进行冷、热点局域关联性分析。公式为^[30]:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n W_{ij}(d) x_j}{\sum_j^n x_j} \tag{6}$$

式中, W_{ij} 为空间权重; x_i 和 x_j 分别是第 i 个 ESV 评价单元和第 j 个 ESV 评价单元的观测值; n 为样本量, 即研究区某一尺度上 ESV 评价单元的总个数。

3 结果与分析

3.1 江苏省土地利用变化综合分析

由 1995—2015 年江苏省土地利用(图 1)可知, 耕地、建设用地和水体为研究区主要土地利用类型, 总覆盖度达到 90% 以上, 其中主要以耕地为主。土地利用类型数量变化呈“三增三减”模式: 水体、建设用地和未利用地面积增加, 林地、草地和耕地面积减少, 其中建设用地急剧增长, 耕地面积快速缩减, 20 年间, $4.01 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 耕地转为建设用地, 土地利用/覆盖变化剧烈。时间上, 基于土地利用动态度模型(1), 得出不同时段内江苏省 6 种土地利用类型变化动态度, 其值越大表明土地利用/覆盖变化速度越快。由表 2 可知, 1995—2005 年, 土地利用动态度(绝对值)表现为: 草地 > 建设用地 > 未利用地 > 水体 > 耕地 > 林地; 其中, 草地动态度为负值, 表明草地面积缩减比例较大, 由于经济发展严重污染了水质, 将主要河流湖泊周围大面积草地修复成水

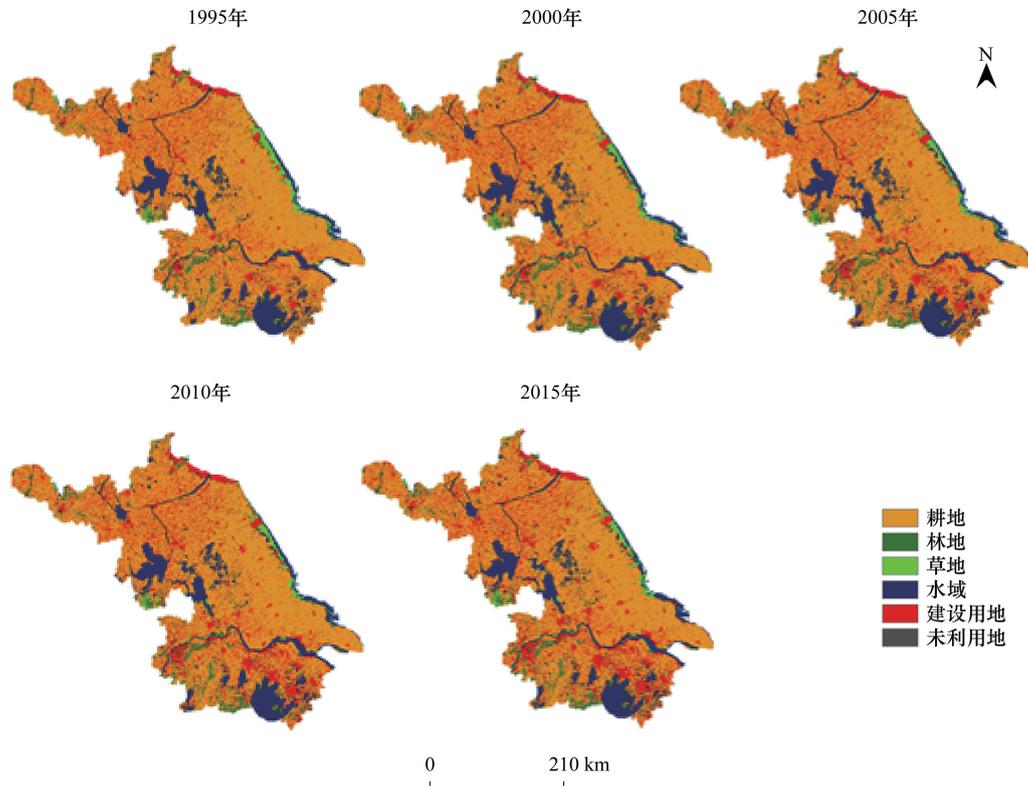


图 1 1995—2015 年江苏省土地利用图

Fig.1 Land use map of Jiangsu Province from 1995—2015

体。2005—2015 年,未利用地变化动态度达到 7.22%,主要是因为 1300hm²水体变为未利用地,表明江苏省在此阶段土地利用不合理,正处于土地转型阶段;并且由于水质治理成果显著一部分水体被规划为生态湿地。总体来看,20 年间建设用地和水体动态度为正,其中建设用地动态度持续上升到 1.77%,表明城市在不断扩张,逐渐聚集以及注重水体的修复治理。未利用地动态度波动较大,急剧上升又急剧下落,表明江苏省在土地开发中产生大量“富余”土地,并不断地优化土地利用。林地、水体以及草地动态度远小于耕地的原因是开发利用难度大、成本高。另一方面,2005—2015 年土地利用类型动态度总体大于 1995—2005 年,说明江苏省在 2005—2015 年土地利用/覆盖变化速度更为显著。空间上,利用香浓多样性指数来描述景观异质性,反映土地利用丰富性。根据(2)计算出 1995—2015 年江苏省各地级市 SHDI。由表 3 可知,1995—2000 年研究区土地利用最为单一,SHDI 值均为 0.98。2005—2015 年,香浓多样性指数每年增加 0.02,2015 年 SHDI 值达到 1.04,13 个地级市中,异质性水平高于该值的有淮安市(1.11)、南京市(1.19)、镇江市(1.10)、苏州市(1.19)、常州市(1.12)和无锡市(1.26)。上述城市大多数位于江苏省南部地区,说明苏南土地利用较为丰富,破碎化程度相对较高,土地利用结构更加合理,而苏中和苏北的土地利用较为单一,需要不断优化其土地利用结构。苏中和苏北地区大都以一种或少数几种土地利用类型为主,主要为耕地及建设用地,2015 年,盐城市耕地面积占总面积比最大达到 75.83%,建设用地所占比例为 11.68%;徐州市耕地面积占比最小为 48.20%,其余各地级市耕地面积占总面积比例均在 55%以上。其中,徐州市、宿迁市、淮安市、盐城市、扬州市和连云港市,20 年间 SHDI 指数变化幅度在-0.01—0.02 之间。

表 2 江苏省土地利用类型变化动态度/%

Table 2 Dynamic degree of land use type change in Jiangsu Province

土地利用类型 Land use type	水体 Water	林地 Forest	草地 Meadows	耕地 Arable land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
1995—2005	0.40	-0.08	-1.96	-0.25	1.16	-1.00
2005—2015	-0.12	-0.16	0.44	-0.37	1.77	7.22
1995—2015	0.14	-0.12	-0.80	-0.31	1.57	2.75

表 3 江苏省及其各地级市香浓多样性指数(SHDI)

Table 3 SHDI of Jiangsu Province and its local cities

地级市 Prefecture-level city	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
徐州市	0.87	0.88	0.88	0.88	0.89
宿迁市	0.93	0.94	0.94	0.95	0.96
淮安市	1.09	1.10	1.10	1.10	1.11
连云港市	0.94	0.94	0.94	0.95	0.97
盐城市	0.82	0.81	0.81	0.82	0.82
扬州市	0.85	0.86	0.87	0.89	0.90
泰州市	0.64	0.66	0.69	0.70	0.73
南通市	0.68	0.68	0.69	0.70	0.74
南京市	1.06	1.10	1.14	1.18	1.19
镇江市	1.00	1.02	1.03	1.08	1.10
苏州市	1.04	1.07	1.13	1.16	1.19
常州市	1.00	1.02	1.07	1.10	1.12
无锡市	1.17	1.18	1.23	1.25	1.26
江苏省	0.98	0.98	1.00	1.02	1.04

3.2 江苏省生态系统服务变化对比分析

基于 1995 年和 2015 年江苏省不同土地利用类型的生态系统功能得分表(表 4),通过定性评估景观功能

表 4 1995 年和 2015 年功能属性的评分工作表
Table 4 Scores for functional attributes in 1995 and 2015

功能属性 Functional attributes		水体 Water	林地 Forest	草地 Meadows	耕地 Arable land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	总计 Total
1995 年								
生态功能 Ecological function	碳汇水平	0	1	1	-1	-2	0	5
	生物多样性	2	1	1	-1	-1	0	
	土壤保持	-1	2	2	-1	-1	0	
	水质	2	2	1	-1	-1	0	
总计 Total		3	6	5	-4	-5	0	
生产功能 Production function	食物生产	1	1	0	2	1	0	24
	原料生产	0	2	1	2	1	0	
	输入效率	1	1	1	1	1	0	
	经济价值	1	2	1	1	2	1	
总计 Total		3	6	3	6	5	1	
文化功能 Cultural function	娱乐	0	2	1	1	1	1	18
	艺术	1	1	1	-1	1	0	
	教育	1	2	1	1	2	0	
	居住	0	0	0	0	2	0	
总计 Total		2	5	3	1	6	1	
属性总计 Attribute total		8	17	11	3	6	2	47
2015 年								
生态功能 Ecological function	碳汇水平	0	2	1	-1	-2	0	2
	生物多样性	1	2	1	-1	-2	0	
	土壤保持	1	2	2	-2	-2	0	
	水质	1	2	1	-2	-2	0	
总计 Total		3	8	5	-6	-8	0	
生产功能 Production function	食物生产	1	1	0	2	1	0	26
	原料生产	0	2	1	2	2	0	
	输入效率	1	1	1	1	1	0	
	经济价值	1	2	1	2	2	1	
总计 Total		3	6	3	7	6	1	
文化功能 Cultural function	娱乐	0	2	1	-1	2	0	20
	艺术	0	2	1	1	2	0	
	教育	1	2	1	1	2	0	
	居住	0	0	0	0	2	1	
总计 Total		1	6	3	1	8	1	
属性总计 Attribute total		7	20	13	2	6	2	50

的表现,分析其生态系统服务变化。近年来经济的迅速发展、工业生活污水的排放、土地的过度利用以及农业生产中产生的损耗,江苏省水体富营养化现象逐渐加重^[31],导致 2015 年水体生态系统中水质与生物多样性得分下降,但由于河岸管制的增强,增强了水体的水土保持能力;由于水体是影响景观美学的重要特征 (frank),因此 1995 年研究区的美学价值相对较高。1991 年至今,随着大规模防护林的建设,形成多林种、多树种、多层次、多功能的综合防护林体系,极大地丰富了沿海地区林业资源与生物多样性,提高了林地生态系统的美学价值^[32];2015 年林地生态系统碳汇水平、生物多样性与文化功能得分高于 1995 年反映了自然物种组成的变化与人工干预的影响。尽管通过实地调查与土地利用影像可以看出草地与未利用地的面积与管理发生了变化,但缺少关于此问题的具体信息与理论支撑。因此,两个时期的草地与未利用地的功能属性都获

得了相同的得分。由于 1995 年耕地的开发和管理强度远不如今天,因此对土壤保持和水质的影响较小,同样产生的经济价值较低(根据经济统计分析得出);另外,小规模人工土地耕作到大规模机械化土地耕作的转换,减少了耕作的娱乐属性但提高了景观的视觉质量。由于城市发展过程中,水泥、沥青等不透水面的增加,2015 年生物多样性与土壤保持得分低于 1995 年,同时经济的迅速发展,导致大量生活污水与工业废水的排放,进一步污染水质;另一方面基础设施的完善又增强了建设用地的生产功能与文化功能。总体而言,耕地的面积份额最大(图 2),尽管在 2015 年耕地面积缩减但依旧占研究区大面积比重。就文化功能来看,森林和建设用地获得了最高分。林地的生态系统服务功能属性最高,尤其在 2015 年,森林达到了生态系统服务功能属性最高得分(20),表明与其他景观类型相比,森林生态系统提供服务的种类最齐全且强度最大。本研究所研究的三类功能属性中,只有耕地和建设用地的生态功能得分为负,1995 年耕地和建设用地的生态功能得分为-4 和-6,2015 年得分分别又下降两个百分点。研究结果还表明,2015 年生态系统服务功能属性与 1995 年相比,除生态功能水平下降,生产功能与文化功能都有所提高。其中,在研究后期耕地和建设用地的生态功能明显下降,同时建设用地的面积比重明显增加。尽管 2015 年生态系统服务所提供的功能属性总得分高于 1995 年,但是在景观规划中尤其要注意对生态系统服务中生态功能的影响,使其在生产能力与供应能力之间达到最优。

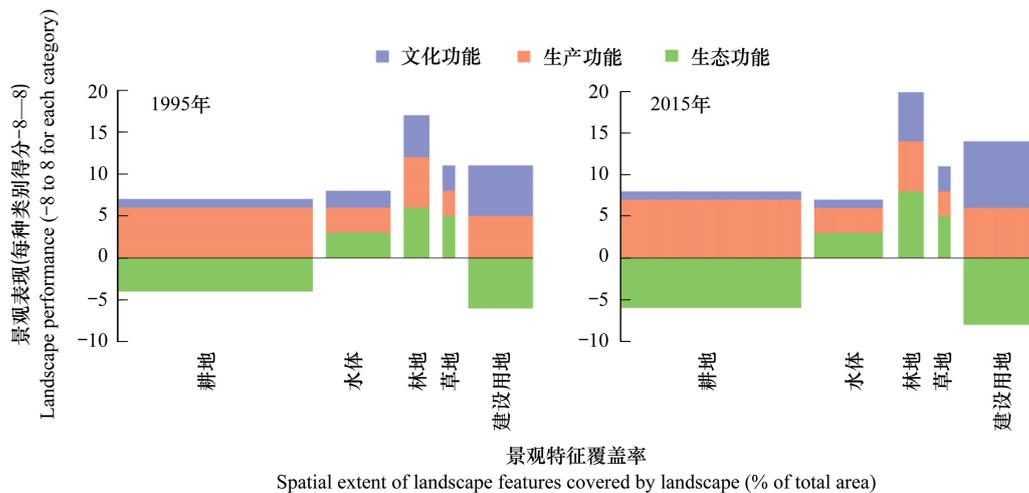


图 2 1995 年和 2015 年功能属性得分图

Fig.2 functional attribute scores in 1995 and 2015

3.3 江苏省生态系统服务价值时空变化特征分析

首先,根据(4),将 4 种土地利用类型的各单项生态系统服务价值系数分别上下调整 50%,来验证价值系数对生态服务价值计算的影响。表 5 显示,1995—2015 年,CS 结果远远小于 1,反映出本研究中测算出的生态系统服务价值的系数与江苏省生态系统服务价值总量之间缺乏弹性。估算出的生态系统服务价值结果适用于江苏省,结果可信。

1995—2015 年江苏省生态系统服务价值持续降低并与多项式曲线高度吻合(图 3)。20 年间生态系统服务价值从 1258.19 亿元减少为 1208.74 亿元,若不及时干预土地利用,根据趋势计算出 2022 年江苏省 ESV 会跌至 1.35 亿元。生态系统服务价值总量下降最快的区域集中在苏南地区。苏州市 ESV 下降最明显,减少了 14.03 亿元,其次为无锡市,ESV 减少了 6.16 亿元,南京市 ESV 降低了 4.46 亿元,镇江市和常州市 ESV 分别减少了 4.10、3.02 亿元。苏中地区 ESV 平均减少 2.57 亿元,苏北地区 ESV 平均减少 1.99 亿元。结合土地利用变化数据可知,研究区生态系统服务总量急剧减少的主要原因是由于耕地和林地的减少,尤其是耕地大面积缩减。社会经济的飞速发展以及城市化水平的快速提高,耕地的开发难度与开发成本相对于其他土地利用类型较低,因此大规模耕地转化为建设用地。2015 年江苏省经济综合竞争力居于中国第一位,经济生产总值从

1995 年的 14.12 亿元,占全国 5.8%,增长到 2015 年的 192.10 亿元,占全国 10.4%,20 年间江苏省经济飞速发展,但是生态系统服务价值总体减少了 29.25 亿元。与此同时,环境污染加剧,环境与经济发展之间的矛盾日益凸显^[33],且郭存芝^[34]通过面板数据模型证实经济发展与土地利用结构是影响生态效率的几个重要因素之一。

表 5 不同土地利用类型生态系统服务价值敏感性指数变化结果

Table 5 Changes in the sensitivity index of ecosystem service values for different land use types

价值系数 VC Value coefficient	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
水体 Water VC±50%	0.000514	0.000524	0.000544	0.000546	0.000546
林地 Forest VC±50%	0.000768	0.000191	0.000813	0.000816	0.000195
草地 Grass VC±50%	0.000308	0.000262	0.00021	0.000242	0.001128
耕地 Arable land VC±50%	0.005435	0.005406	0.005212	0.005328	0.005344

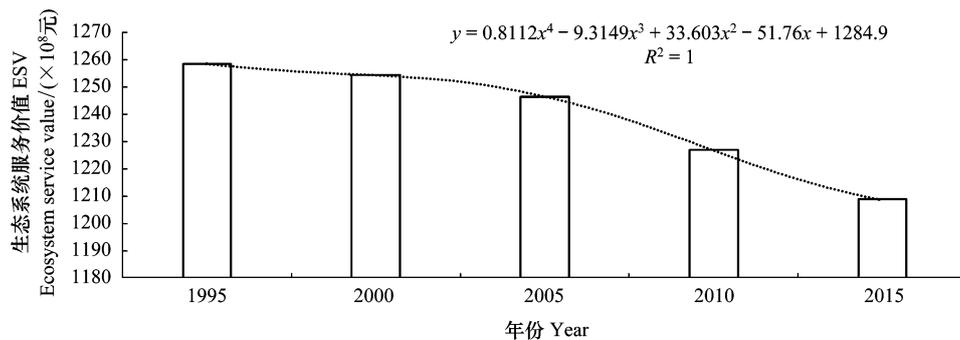


图 3 1995—2015 年江苏省生态系统服务价值变化趋势

Fig.3 Changes in the value of ecosystem services in Jiangsu Province from 1995—2015

根据江苏省 1995—2015 年生态系统服务价值的空间自相关性结果(表 6)。结果显示,根据 P 值,1995、2000 和 2005 年 $0.05 > P < 0.1$,无法拒绝零假设,无分析价值。2010 和 2015 年,江苏省生态系统服务价值数据小于 5%的可能是随机的,出现数据集聚的可能性大于随机分布可能,且能显著的拒绝零假设;表明在 2010 和 2015 年,江苏省生态系统服务价值的空间分布具有较强的空间相关性,在空间上呈现空间聚集分布格局,但没有显著的变化。为进一步更好的揭示研究区内生态系统服务价值在空间上的变化,应用热点分析式(6)来显示生态系统服务价值变化量在空间上的局部表现(图 4)。热点分析表明,1995—2015 年生态系统服务价值变化的热点区域主要位于江苏省南部,常州市,无锡市和苏州市;苏北地区宿迁市为冷点区,其余地区无显著变化。热点分析的结果和统计结果基本吻合,苏南地区生态系统服务价值缩减剧烈。另外,江苏省生态系统服务价值的变化与土地利用/覆盖变化呈线性相关并且与区域经济发展规律大致相近,进一步证明了土地利用结构会对生态效率造成影响。因此,苏南地区为响应可持续发展,在土地利用过程中要贯彻优化大于开发原则,保护优质耕地合理规划土地,而苏中与苏北地区应在遵循生态红线原则上加强土地的开发利用刺激经济增长,进而缩小区域经济差异,实现生态资源的保护、生态系统功能的优化及经济协同发展的目标。

表 6 1995—2015 年生态系统服务价值空间相关性分析结果

Table 6 Correlation analysis of ecosystem service value space from 1995—2015

	1995	2000	2005	2010	2015
莫兰指数 Moran's index	0.21	0.22	0.24	0.261	0.26
Z 得分 Z-score	1.69	1.75	1.88	2.018	2.02
P	0.091808	0.079844	0.060353	0.043578	0.04321

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于 LUC 研究首先以 1995—2015 年研究区经济发展重要时间节点的土地利用数据系统分析土地利用/覆盖变化特征,然后引入评估计分理论对生态系统服务变化进行动态评估,最后通过修正当量因子计算生态系统服务价值并应用空间自相关与热点分析研究江苏省生态系统服务及其价值的时空变化特征。结论如下:

(1)耕地、建设用地和水体为研究区主要土地利用类型,总覆盖度达到 90% 以上,其中主要以耕地为主;土地利用类型数量变化呈“三增三减”模式;时间上,江苏省在 2005—2015 年土地利用变化速度显著;空间上,苏南地区土地利用丰富,苏中与苏北地区土地利用单一。由于全省土地利用不均衡从而会威胁生态系统稳定性。

(2)一方面森林生态系统具有较强的生态功能、生产功能和文化功能,另一方面 2015 年功能属性总得分高于 1995 年,但生态功能水平下降,森林面积较 1995 年减少 8100hm²,因此在景观规划中必须关注对生态系统服务功能的影响尤其注意对生态功能的影响,使其生产能力与供应能力达到最优。

(3)1995—2015 年江苏省生态系统服务价值总体下降 49.45 亿元,据预测至 2022 年,ESV 会跌到 1.35 亿元。苏南地区价值变化最大,其中苏州市 ESV 缩减 9.03 亿元。经济发展、土地利用结构与生态效率之间的关系不容忽视,苏南地区为响应可持续发展,在土地利用过程中要贯彻优化大于开发原则而苏中与苏北地区应在遵循生态红线原则上加强土地的开发利用刺激经济增长。

4.2 讨论

本文基于 LUC 研究江苏省生态系统服务价值时空变化特征,并将生态系统的调节服务、支持服务、供给服务和文化服务和土地利用的景观功能(生态、生产和文化)相联系,与江苏省类似的生态系统服务价值研究相比,可更全面地描述生态系统服务的变化情况。但是确定研究区生态系统服务价值采用基于单位面积价值当量因子并运用粮食产量修正^[25]的方法,该方法数据获取简便、计算过程容易、适用性与接受度较强并且便于结果比较。但没有考虑人与环境系统的复杂性和异质性而导致的价值泛化和转移误差等问题从而使结果存在不确定性。总之本文分析生态系统服务价值的时空变化特征为江苏省协同经济发展与生态文明建设、缩小区域经济差异进行科学土地整治提供理论依据,但计算方法有待于进一步完善。

参考文献 (References):

- [1] 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(6630): 253-260.
- [2] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 118-126.
- [3] Alcamo J, Bennett E M, Millennium Ecosystem Assessment. *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [4] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [5] Preston B L, Yuen E J, Westaway R M. Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. *Sustainability Science*, 2011, 6(2): 177-202.

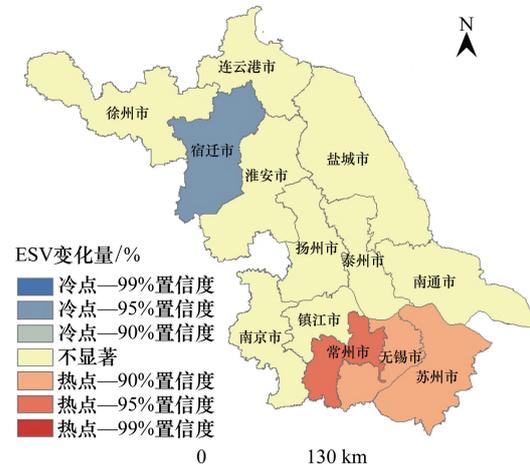


图 4 1995—2015 年江苏省生态系统服务价值变化量热点分析
Fig.4 Analysis ecosystem service values with Hot Spot in Jiangsu Province from 1995—2015

- [6] Shao J A, Ni J P, Wei C F, Xie D T. Land use change and its corresponding ecological responses: a review. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(3): 305-328.
- [7] 赵海凤. 四川省森林生态系统服务价值计量与分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [8] 王兵. 生态连清理论在森林生态系统服务功能评估中的实践. *中国水土保持学报*, 2016, 14(1): 1-11.
- [9] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 顾剑红, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 马超. 土地利用变化对生态服务价值的影响——以广西隆林县和西林县为例. *中国水土保持科学*, 2016, 14(5): 100-109.
- [13] 罗维, 易海杰, 李红举, 贾文涛, 冯兆忠. 洋河流域土地利用时空变异及其对生态服务功能价值的影响. *生态学报*, 2017, 37(16): 5342-5351.
- [14] 肖建设, 乔斌, 陈国茜, 史飞飞, 曹晓云, 祝存兄. 黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变. *生态学报*, 2020, 40(2): 510-521.
- [15] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [16] 韩伟. 无锡土地利用变化及生态系统服务价值研究. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2017, 34(3): 88-92.
- [17] 于森, 吕晓, 廉丽妹, 史洋洋. 江苏省沿海地区土地利用变化及其生态效应. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 131-139.
- [18] Lovell S T, DeSantis S, Nathan C A, Olson M B, Méndez V E, Kominami H C, Erickson D L, Morris K S, Morris W B. Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: an evolving framework to evaluate the design of agroecosystems. *Agricultural Systems*, 2010, 103(3): 327-341.
- [19] UK NEA [UK National Ecosystem Assessment]. *The UK National Ecosystem Assessment: Synthesis of the Key Findings*. Cambridge: United Nations Environment Programme, World Conservation Management Centre, 2011.
- [20] 陈鹏飞. 北纬 18° 以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985-2015). *全球变化数据学报*, 2019, 3(1): 34-41, 143-150.
- [21] 朱会议, 李秀彬, 何书金, 张明. 环渤海地区土地利用的时空变化分析. *地理学报*, 2001, 56(3): 253-260.
- [22] Zhang W, Ricketts T H, Kremen C, Carney K, Swinton S M. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 253-260.
- [23] Flynn D F B, Gogol-Prokurat M, Nogeire T N, Molinari N, Richers B T, Lin B B, Simpson N, Mayfield M M, DeClerck F. Loss of functional diversity under land use intensification across multiple taxa. *Ecology Letters*, 2009, 12(1): 22-33.
- [24] Frank S, Fürst S, Koschke L, Makeschin F. A contribution towards a transfer of the ecosystem service concept to landscape planning using landscape metrics. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 30-38.
- [25] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例. *地理研究*, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [26] 王拾彝. 基于 GIS 的汤原县土地利用/覆被变化及生态效应评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [27] 谢余初, 巩杰, 赵彩霞, 颜耀文. 干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应——以甘肃省金塔县为例. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 165-170.
- [28] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 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. *生态学报*, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [29] 刘耀林, 张扬, 张琰, 刘以, 王好峰, 刘艳芳. 特大城市“三线冲突”空间格局及影响因素. *地理科学进展*, 2018, 37(12): 1672-1681.
- [30] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [31] 范成新, 羊向东, 史龙新, 徐道清, 张泉荣, 吴朝明. 江苏湖泊富营养化特征、成因及解决途径. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 218-223.
- [32] 缪雨薇. 江苏沿海防护林优化目标模式选择及措施研究. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [33] 刘旖. 江苏省环境与经济协调发展研究. *管理观察*, 2019, (18): 104-105.
- [34] 郭存芝, 罗琳琳, 叶明. 资源型城市可持续发展影响因素的实证分析. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(8): 81-89.