

快速城市化背景下生态系统服务价值时空演变 ——以南京市为例

孟孟^{1,2}, 张运^{1,2}, 支俊俊^{1,2}, 丁玥^{1,2}, 王爱芳^{1,2}, 沈豪^{1,2}

(1.安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;

2.资源环境与地理学信息工程安徽省工程技术研究中心, 安徽 芜湖 241003)

摘要: [目的] 分析南京市土地生态服务价值的驱动力影响,为科学地开展生态系统服务价值研究、生态保护与建设、城乡空间布局优化以及土地可持续发展提供重要依据。[方法] 基于江苏省南京市1990—2018年的土地利用数据,估算了各种土地利用类型的生态系统服务价值,分析了南京市生态系统服务价值的时空动态及其对土地利用变化和景观格局变化的响应。[结果] 1990—2018年,南京市建设用地面积变化最大,耕地次之,草地、林地和水域的变化较小,其中建设用地面积增加了105.67%,耕地面积减少了19.93%;南京市斑块密度由0.589 0下降至0.512 5,表明总体景观破碎度指数在持续降低;南京市总的生态系统服务价值总体呈下降的趋势,降低了8.13%,其中水域的生态系统服务价值的变化对总的生态系统服务价值影响最为显著。[结论] 随着南京市社会经济发展,人口对于生态系统服务价值时空变化的影响高于经济因素,人口因素日益成为影响南京市生态系统服务价值的主要驱动因素。

关键词: 南京市; 土地利用; 景观格局; 生态系统服务价值; 驱动因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0296-09

中图分类号: F062.2, X171.1

文献参数: 孟孟, 张运, 支俊俊, 等.快速城市化背景下生态系统服务价值时空演变[J].水土保持通报, 2021,41(3):296-304.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.039; Meng Meng, Zhang Yun, Zhi Junjun, et al. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value under rapid urbanization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):296-304.

Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Service Value Under Rapid Urbanization — A Case Study of Nanjing City

Meng Meng^{1,2}, Zhang Yun^{1,2}, Zhi Junjun^{1,2}, Ding Yue^{1,2}, Wang Aifang^{1,2}, Shen Hao^{1,2}

(1.School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003, China;

2.Engineering Technology Research Center of Resources Environment and GIS, Wuhu, Anhui 241003, China)

Abstract: [Objective] The impacts of the driving force of land ecosystem service value in Nanjing City were analyzed in order to provide important evidence for scientific research on the ecosystem service value, ecological protection and construction, optimization of urban and rural spatial layout, and sustainable development of land. [Methods] The ecosystem service values of various land use types were estimated based on land use data from 1990 to 2018 in Nanjing City, Jiangsu Province. The spatiotemporal dynamics of the ecosystem service values were analyzed, and their responses to changes in land use and landscape pattern were demonstrated. [Results] The area of construction land in Nanjing City changed significantly from 1990 to 2018, and was followed by changes in the area of cultivated land. Construction land area increased by 105.67%, while cultivated land area decreased by 19.93%. However, little change was found for cultivated land, grassland, woodland, and water. Patch density of Nanjing City decreased from 0.589 0 to 0.512 5, indicating that the overall landscape fragmentation index continued to decrease. The total ecosystem service value of Nanjing

收稿日期:2021-02-23

修回日期:2021-03-20

资助项目:安徽省教育厅自然科学研究重点项目“基于高光谱成像仪的水稻白叶枯病早期探测研究”(KJ2019A0509); 2020年安徽省科技重大专项“现代农业遥感监测系统构建与产业化应用”(202003a06020002)

第一作者:孟孟(1997—),女(汉族),安徽省阜阳市人,硕士研究生,研究方向为农业遥感应用。Email:monty27@163.com。

通讯作者:张运(1976—),男(汉族),安徽省枞阳市人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事定量遥感、遥感应用、遥感图像处理以及地理信息系统应用与开发等方面的研究。Email:zy2009@mail.ahnu.edu.cn。

City showed a falling trend, decreasing by 8.13%, while the most significant change existed for water. [Conclusion] Along with social and economic development of Nanjing City, population have a greater influence on the spatiotemporal change of the ecosystem service value than economic factors. Population has increasingly become the main driving factor affecting the ecosystem service value of Nanjing City.

Keywords: Nanjing City; land use; landscape pattern; ecosystem services value; driving factors

随着城市化进程的不断推进,人们的生产、生活和居住方式发生巨大的转变,生态系统也受到了严重的影响,协调社会经济和生态间的矛盾成为当前亟需解决的问题^[1-2]。生态系统不仅能够为人类提供各种商品,也在维持生命的支持系统和环境的动态平衡等方面发挥着重要作用^[3]。生态系统服务是指通过生态系统维持和实现人类生活的一切条件和过程^[4]。不仅为人类提供了各种各样的生产生活原料,还维护着人类必需的生命系统,维持了自然界的生物地球化学循环与水文循环,有助于保持物种与遗传多样性,净化环境、维持大气化学的平衡和稳定性^[5-7]。

在人类与自然进行紧密的交互的过程中,土地利用结构的变迁加速了生态系统服务功能的变化。目前,从价值量化的角度来评估土地利用变化引起的区域生态服务效应是生态学领域的研究热点之一^[8-10]。虎陈霞等^[11]利用生态系统服务价值当量换算方法,研究了嘉兴市 30 a 多来土地利用动态变化与生态系统服务价值之间的关系,发现土地利用类型和景观格局的变动容易造成生态系统服务功能发生显著变化。孙思琦等^[12]结合 GIS 和 RS 技术,通过全国平均状态下的生态系统服务单价系数修正,估算出巫山县单位面积生态系统服务价值当量,表明探究城市化下土地利用/覆盖及景观格局的异质对生态系统服务功能价值的影响对于促进区域土地资源合理利用和生态环境保护具有不可忽视的现实意义。由于生态系统本身所具有的特殊性、复杂性和多元性,不同调查和研究在定量计算时均存在参数选取与赋值等方面的差异。综合分析来看,基于单位生态服务产品价格的当量因子法在进行生态系统服务价值核算时,考虑到了研究区内的作物产值,一般情况下得出的结果较为符合实际情况,但由于数据需求高、评价标准不统一、计算繁琐^[13-15]等问题难以实现广泛而高效的应用。而基于标准单位面积价值当量因子的方法则相对简单、易于应用。因此,本研究将以国家标准状态下生态系统单位面积生态服务价值当量表为基础,结合区域修正系数进行调整,以获取更适用于研究区的生态系统服务价值评估指标体系。

作为长三角辐射带动中西部地区发展的国家重要门户城市,南京的新型城镇化建设扎实推进,城乡

融合发展不断深入,与此同时所面临的生态环境压力也与日俱增,区域生态系统功能遭到明显削弱^[16-18]。本文基于南京市 1990—2018 年 4 期的土地利用数据,定量地分析不同年份的土地利用面积和景观格局变化情况,并结合国内外学者针对生态系统服务功能价值的估算方法,评估不同尺度下各种土地利用类型的生态系统服务价值,探讨快速城市化背景下南京市生态系统服务价值时空变化特征,从人为因素和社会经济因素等两个方面综合地分析南京市土地生态服务价值的驱动力影响,为科学地开展生态系统服务价值研究、生态保护与建设、城乡空间布局优化以及土地可持续发展提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南京市位于江苏省西南部和长江下游中部,是江苏省的省会城市。其地理坐标为 31°14"—32°37"N, 118°22"—119°14"E,包括了 11 个市辖区,全市总面积约 6 587.02 km²,常住人口达 8.50×10⁶ 人,城镇化率 83.2%,是中国十大城市之一。南京地处宁镇的丘陵地带,地貌变化多样,有环形山脉、条状山脉和箕状盆地。该地区年平均气温 15~16℃,年平均降雨量约为 1 106.5 mm,全市的森林覆盖率约为 22%,水域面积达 11%以上,对南京市总的生态系统服务价值有较突出的贡献。南京市地理区位条件优越,资源条件丰富,社会经济发展迅速,已进入率先实现现代化、加快城市创新转型的关键时期^[19]。在快速城市化进程中,如何高效配置土地资源、最大限度地发挥生态系统服务功能等一系列问题逐渐引起了人们的关注。

1.2 数据来源

改革开放以来,中国走上了快速城市化的道路,统计资料显示中国城市化率从 1990 年的 26.41% 增长到 2019 年的 60.60%,尤其在党的十四大以后,我国的城市化进程加速。1991 年,南京市政府开始着手修编总体规划,首次提出了“南京都市圈”的概念,并提出加快外围城镇发展,将城市建设重点向外围城镇转移。从人口统计数据 and 产业数据来看,南京市自 90 年代以来起,人口每年都呈现出一定的增长趋势,3 个产业的年增长速率超过 100%,成为了改革开放以来的快速增长时期。鉴于此,本文采用了南京市

1990, 2000, 2010, 2018 年土地利用数据为基础数据源, 根据土地资源及其利用属性, 紧密结合全国县级土地利用现状分类系统, 将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等 6 个一级类, 在本次研究过程中建设用地未被纳入生态系统服务价值估算的范畴。根据南京市统计年鉴, 收集 1990—2018 年粮食作物单产等农业指标, 以及人口、社会经济指标等资料, 收集整理后作为数据源。本研究中土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学

数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用景观格局 由于景观指数能够有效概括景观格局状况, 反映土地利用结构和空间配置等^[20], 本文利用 ArcGIS10.1 和 Fragstats 4.2, 结合 1990—2018 年南京市土地利用数据, 计算出南京市整体情况下的景观指数以及耕地和水域的斑块密度和分离度指数^[21], 研究中所使用到的各景观指数及意义如表 1 所示。

表 1 研究中用到的景观指数及其意义

景观指数名称	英文缩写	意义
斑块密度	PD	反映景观斑块分化程度和景观异质性程度
蔓延度指数	CONTAG	描述不同景观类型在景观中的团聚程度或延展趋势
香农多样性指数	SHDI	反映景观的异质性, 景观类型越多, 多样性指数就越高
聚集度指数	AI	描述群体内个体集中方式/分布方式的程度
分离度指数	SPLIT	描述同类型斑块在景观中的分散程度或破碎度
平均斑块分维数	FRAC_MN	描述同类斑块边缘的平均褶皱程度, 值越趋近 1, 受人为干扰越大
平均斑块面积	AREA_MN	描述景观粒度, 反映同类斑块的破碎化程度

1.3.2 生态系统服务价值评估方法 为了改进 Costanza 等^[4]提出的生态系统服务价值评估方法在中国应用时存在的缺陷, 谢高地等^[22]人在此基础之上, 构建了一种基于专家知识的生态系统服务评估单价体系。该方法根据中国民众和决策者对生态服务的理解程度, 将生态服务重新划分为食物生产、原材料生产、美学景观、气体调节、气候调节、水源涵养、土壤保持、废物处理、生物多样性维持共 9 种类型。本研究参照国内学者研究^[23-26]提出的生态系统服务价值估算方法, 得到 2010 年标准生态系统生态服务价值当量因子经济价值量的值为 3 406.50 元/hm²。根据南京市统计年鉴, 南京市 2010 年单位面积粮食产量为 6 868 kg/hm², 而同期全国单位面积粮食产量分别为

4 973.58 kg/hm², 修正后得到南京市一个生态系统服务价值当量因子为 4 704.38 kg/hm²。根据谢高地等^[22]针对农田、森林、草地、湿地、荒漠和水域这 6 类生态系统所建立的中国生态系统服务价值当量因子表^[27], 经过计算得出南京市不同生态系统单位面积的服务价值系数(表 2), 计算公式^[28]如下:

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

$$ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk})$$

式中: ESV 代表生态系统功能服务价值量; A_k 表示土地利用类型 k 类型的面积; VC_k 表示生态系统服务价值系数; ESV_f 表示生态系统第 f 项服务功能价值; VC_{fk} 代表土地利用类型 k 类型的第 f 项生态系统服务功能价值系数。

表 2 南京市不同土地利用类型的生态系统服务价值系数

元/(hm²·a)

生态系统服务功能	耕地	林地	草地	水域	未利用地	合计
食物生产	4 704.38	470.44	1 411.31	470.44	47.04	7 103.61
原材料生产	470.44	12 231.39	235.22	47.04	0.00	12 984.09
气体调节	2 352.19	16 465.33	3 763.50	0.00	0.00	22 581.02
气候调节	4 186.90	12 701.83	4 233.94	2 164.01	0.00	23 286.68
水文调节	2 822.63	15 054.02	3 763.50	95 875.26	141.13	117 656.54
废物处理	7 715.18	6 162.74	6 162.74	85 525.63	47.04	105 613.33
保持土壤	6 868.39	18 347.08	9 173.54	47.04	94.09	34 530.15
维持生物多样性	3 340.11	15 336.28	5 127.77	11 713.91	1 599.49	37 117.56
提供美学景观	47.04	6 021.61	188.18	20 417.01	47.04	26 720.88
合计	32 507.27	102 790.70	34 059.71	216 260.35	1 975.84	387 593.87

1.3.3 人为影响综合指数计算 人的社会活动是影响景观格局变动的重要因素之一, 自然生态系统的原

始特性相对减弱, 不同的土地利用类型代表着不同的人类开发利用强度^[8]。本文采用人为影响综合指数

来描述各景观单元内受影响强度的大小,具体的计算公式^[29]为:

$$HAI = \frac{\sum_{i=1}^N A_i S_i}{TA} \quad (2)$$

式中:HAI表示人为影响综合指数;N代表研究地区内土地利用类型的数量; A_i 代表第*i*种土地利用类型的面积; S_i 表示第*i*种土地利用的人为影响强度系数;TA表示总面积。本文将以相关学者的研究

成果^[30-32]确定人为影响强度系数 S_i (表3)。

1.3.4 生态系统服务价值时空差异驱动分析 相关研究表明,生态系统功能服务价值在短时间内主要受到人为因素方面的干扰^[33]。本研究建立在国内学者已有研究^[34]的基础之上,并结合数据的可获取性,选取人口、经济、居民生活状况、旅游和城市化率^[35]等19个指标在SPSS软件中标准化处理后进行分析,以此确定研究区域生态系统服务价值时空变化的主要驱动因素。

表 3 不同土地类型人为影响强度系数

土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
人为影响强度系数 S_i	0.61	0.12	0.09	0.01	0.94	0.08

2 结果与分析

2.1 南京市土地利用变化

1990—2018年南京市土地利用类型发生明显变化,尤其是中部地区(图1,表4)。耕地面积28a内减

少了871.09 km²,建设用地则增加了882.17 km²。表明自1990年起,南京市土地利用变化以耕地向建设用地转化为主,其余用地变化幅度相对较小。说明南京市城市化进程持续推进,高强度开发使建设用地不断增加,以耕地为主的大量生产生态用地^[10]受到侵占。

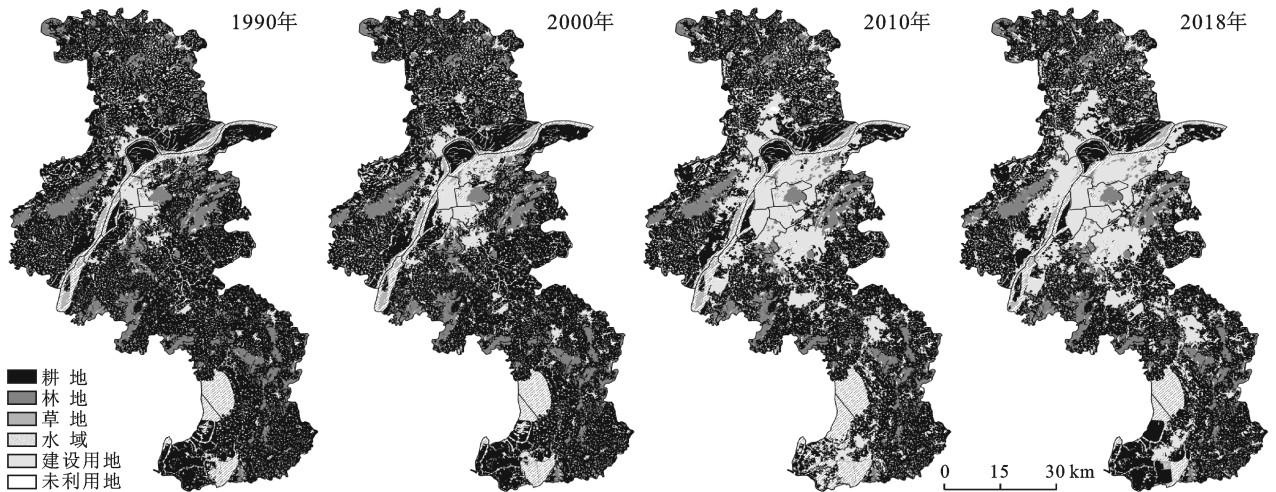


图 1 1990—2018年南京市土地利用变化

表 4 1990—2018年南京市各土地利用类型面积变化

类型	1990—2000年		2000—2010年		2010—2018年		1990—2018年	
	变化/km ²	变化率/%	变化/km ²	变化率/%	变化/km ²	变化率/%	变化/km ²	变化率/%
耕地	-223.43	-5.11	-628.43	-15.15	-19.23	-0.55	-871.09	-19.93
林地	-6.56	-0.93	-25.75	-3.67	-9.7	-1.44	-42.01	-5.94
草地	-1.6	-2.57	-5.6	-9.23	1.68	3.05	-5.52	-8.87
水域	12.88	2.12	141.5	22.8	-133.68	-17.54	20.7	3.41
建设用地	218.71	26.2	495.63	47.04	167.83	10.83	882.17	105.67
未利用地	0.01	0.27	22.65	604	-7.02	-26.59	15.64	418.18

2.2 南京市土地利用景观格局变化

从近30a来南京市景观指数变化(表5)可以看出,斑块密度指数从1990年的0.5890下降至2018

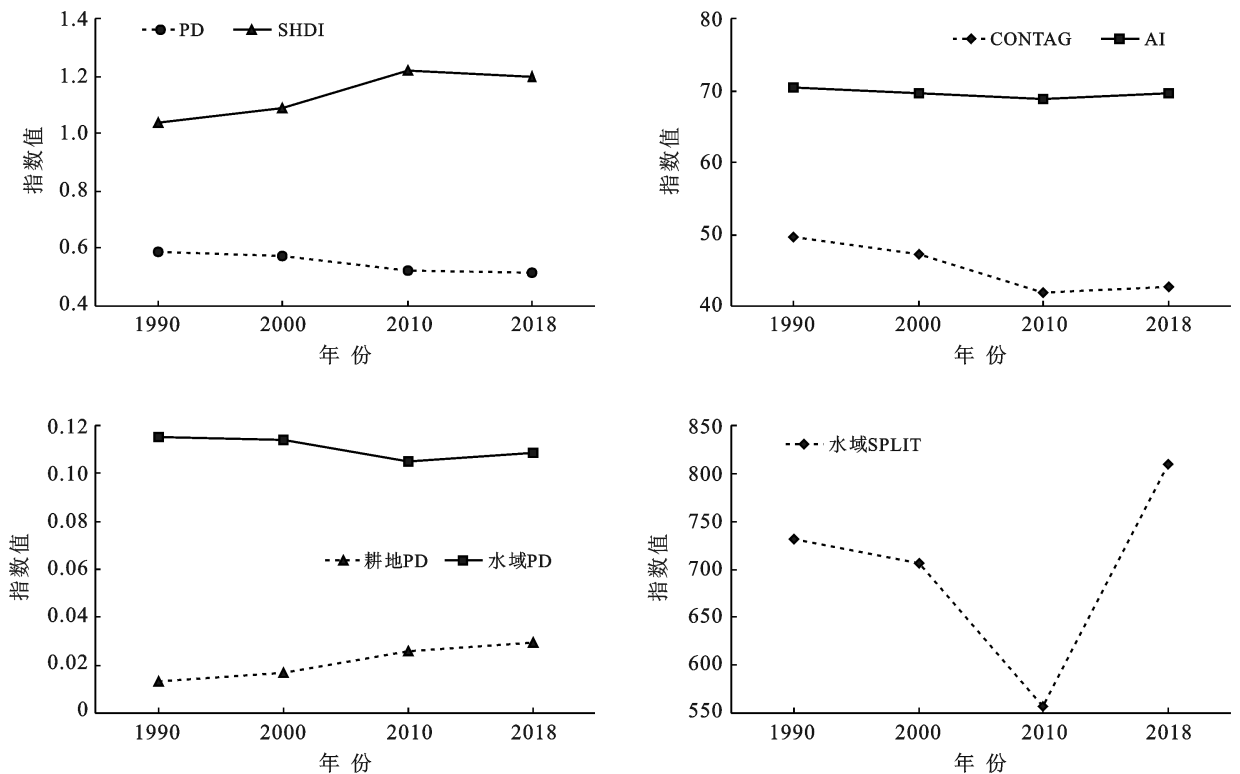
年的0.5125,表明南京市土地利用景观破碎化程度有所降低。香农多样性指数在某种程度上反映研究区土地类型分布的异质性,类型越多,多样性指数就

越高^[36]。研究期内南京市的香农多样性呈现出逐年缓慢递增的趋势,南京市不同土地利用景观类型分布较为均衡。从整体上看,1990—2018年南京市土地利用的蔓延度指数和分布聚合性指数均呈现出递减的趋势(图2),平均斑块面积逐渐增大,平均斑块分维数均接近于1,说明在城市化快速发展的关键期,

南京市各景观类型斑块的集中程度有所提高,各斑块形状较为简单,人为干扰因素对生态系统影响较为显著。耕地生态系统的斑块密度连年攀升,水域生态系统的分离度指数呈现出先减后增的趋势,造成该趋势的原因可能由于城市化开发和水产养殖业的发展等因素^[37],使耕地破碎度增加,水域趋于离散化。

表 5 1990—2010 年南京市土地利用景观指数变化

年份	斑块密度 (PD)	平均斑块面积 (AREA_MN)	平均斑块分维数 (FRAC_MN)	蔓延度指数 (CONTAG)	香农多样性指数 (SHDI)	聚集度指数 (AI)
1990	0.589 0	169.782 8	1.019 2	49.484 0	1.038 3	70.511 2
2000	0.575 3	173.810 2	1.020 3	47.127 1	1.089 5	69.663 4
2010	0.520 5	192.118 0	1.024 0	41.742 2	1.218 6	68.833 6
2018	0.512 5	195.129 4	1.023 7	42.605 7	1.198 1	69.478 7



注:PD为斑块密度;SHDI为香农多样性指数;CONTAG为蔓延度指数;AI为聚集度指数;SPLIT为分离度指数。

图 2 南京市土地利用景观指数变化

2.3 南京市土地生态系统服务价值的时空变化

1990—2018年,南京市土地生态系统功能服务价值整体呈下降的趋势(表6)。在2000—2018年,南京市土地生态系统服务价值减少了 3.05×10^9 元,尤其以水域生态系统服务价值下降最为明显(表7)。随着城市化进程不断推进,可提供服务价值的生态用地明显减少,生态环境的稳定性有所下降。张骞等^[38]研究发现,生态用地结构变化导致生态系统服务价值变化,而生态系统服务价值的变化则影响整个区域的生态效

益,造成城市建设用地与生态用地新结构的形成。通过对比可知,耕地和水域是南京市生态系统功能服务的主要提供者,耕地和水域为南京市提供的生态系统服务价值最高占比分别为40.79%和47.02%,自2010年起水域成为南京市生态系统服务价值的最高提供者。

城市化水平和城市建设用地之间具有显著的相关性,建设用地扩张是城市化发展的必然结果^[39]。从时间尺度上,1990—2018年南京耕地面积逐年减少而建设用地面积不断增加,生态系统服务功能较强

的耕地变成了无法提供生态服务功能的建设用地,因此南京市生态服务功能遭到削弱。另一方面,从空间尺度上,随着南京市区域城市化的建设与发展,农业

人口逐渐向城区迁移,人口对生态系统的干扰性增强,越来越多的农田被建设用地占用,在一定程度上造成本地的生态系统服务功能降低。

表6 1990—2018年南京市各土地利用类型生态系统服务价值估算

年份	耕地		林地		草地		水域		未利用地		合计/ 10 ⁸ 元
	价值/ 10 ⁸ 元	比例/ %	价值/ 10 ⁸ 元	比例/ %	价值/ 10 ⁸ 元	比例/ %	价值/ 10 ⁸ 元	比例/ %	价值/ 10 ⁸ 元	比例/ %	
1990	142.07	40.79	72.71	20.87	2.12	0.61	131.43	37.73	0.007 4	0.00	348.34
2000	134.81	39.29	72.03	20.99	2.07	0.60	134.22	39.12	0.007 4	0.00	343.13
2010	114.38	32.63	69.39	19.80	1.88	0.53	164.82	47.02	0.052 2	0.01	350.51
2018	113.76	35.55	68.39	21.37	1.93	0.60	135.91	42.47	0.038 3	0.01	320.02

表7 1990—2018年南京市各土地利用类型生态系统服务价值变化

年份	耕地		林地		草地		水域		未利用地		合计	
	价值/ 10 ⁸ 元	变化率/ %	价值/ 10 ⁸ 元	变化率/ %	价值/ 10 ⁸ 元	变化率/ %	价值/ 10 ⁸ 元	变化率/ %	价值/ 10 ⁸ 元	变化率/ %	价值/ 10 ⁸ 元	变化率/ %
1990—2000	-7.26	-5.11	-0.67	-0.93	-0.05	-2.58	2.79	2.12	0.00	0.14	-5.21	-1.49
2000—2010	-20.43	-15.15	-2.65	-3.67	-0.19	-9.23	30.60	22.80	0.04	604.77	7.38	2.15
2010—2018	-0.63	-0.55	-1.00	-1.44	0.06	3.05	-28.91	-17.54	-0.01	-26.59	-30.49	-8.70
1990—2018	-28.32	-19.93	-4.32	-5.94	-0.19	-8.87	4.48	3.41	0.03	418.05	-28.32	-8.13

从1990—2018年南京市生态系统服务功能的价值构成来看(表8),南京市不同土地利用类型的各项生态服务价值贡献依次为:废物处理>水文调节>保持土壤>维持生物多样性>气候调节>气体调节>食物生产>提供美学景观>原材料生产。其中自1990—2000年,南京市生态系统服务功能价值总体上有所减少,但单项生态系统服务功能没有发生明显变化。2000—2010年各项服务功能价值变化趋势较为显著,主要表现在水文调节功能由 8.20×10^9 元上升到 9.34×10^9 元,废物处理功能由 8.98×10^9 元上升

到 9.68×10^9 元,提供美学景观功能由 1.71×10^9 元上升到 1.98×10^8 元,其他生态服务功能则呈现出下降的趋势且变化幅度不大。

由于2000—2010年水域面积增长了22.80%,而水域生态系统具有较强的水文调节功能和废物处理功能,因此相应的生态系统服务价值有所上涨,共增长了 3.06×10^9 元。结合表4中分析可知,2010—2018年由于南京市水域面积减少了17.54%,水域生态系统服务的优势减弱,南京市整体生态系统服务价值有所降低。

表8 1990—2018年南京市各项生态系统服务价值估算

类型	1990年		2000年		2010年		2018年		排序
	价值/10 ⁸ 元	比例/%	价值/10 ⁸ 元	比例/%	价值/10 ⁸ 元	比例/%	价值/10 ⁸ 元	比例/%	
食物生产	21.27	6.11	20.22	5.89	17.31	4.94	17.15	5.36	7
原材料生产	10.75	3.09	10.57	3.08	9.96	2.84	9.83	3.07	9
气体调节	22.16	6.36	21.52	6.27	19.60	5.59	19.40	6.06	6
气候调节	28.86	8.29	27.86	8.12	25.19	7.19	24.70	7.72	5
水文调节	81.49	23.39	81.99	23.89	93.37	26.64	80.36	25.11	2
废物处理	90.44	25.96	89.77	26.16	96.83	27.62	85.20	26.62	1
保持土壤	43.60	12.52	41.93	12.22	37.10	10.58	36.79	11.50	3
维持生物多样性	32.89	9.44	32.19	9.38	31.36	8.95	29.58	9.24	4
提供美学景观	16.89	4.85	17.10	4.98	19.80	5.65	17.01	5.32	8
合计	348.34	100	343.13	100	350.51	100	320.02	100	

2.4 南京市生态系统服务价值时空差异驱动力

从前面的分析结果来看,1990—2018年南京市生态系统功能服务价值总体呈现出先减少后增加再

减少的趋势,其中2000—2010年南京市生态环境状况有所改善,生态系统服务价值增长趋势显著。Yang等^[40],孙洪波等^[41]研究表明,人为干扰及社会

经济等因素会导致区域土地利用类型结构变化,从而改变生态系统物种组成和结构,并进一步影响研究地区生态系统的各项服务功能效果。为进一步探索南京市生态系统服务价值演变的主要原因,本文从人为干扰和社会经济因素两方面分析了生态系统服务价值变化的驱动因素。

2.4.1 人为影响因素驱动力 本研究采用网格取样法,对每个样本(网格)的人为影响强度进行加权计算,把获得的综合指数作为样本中心点的值。一般认为,

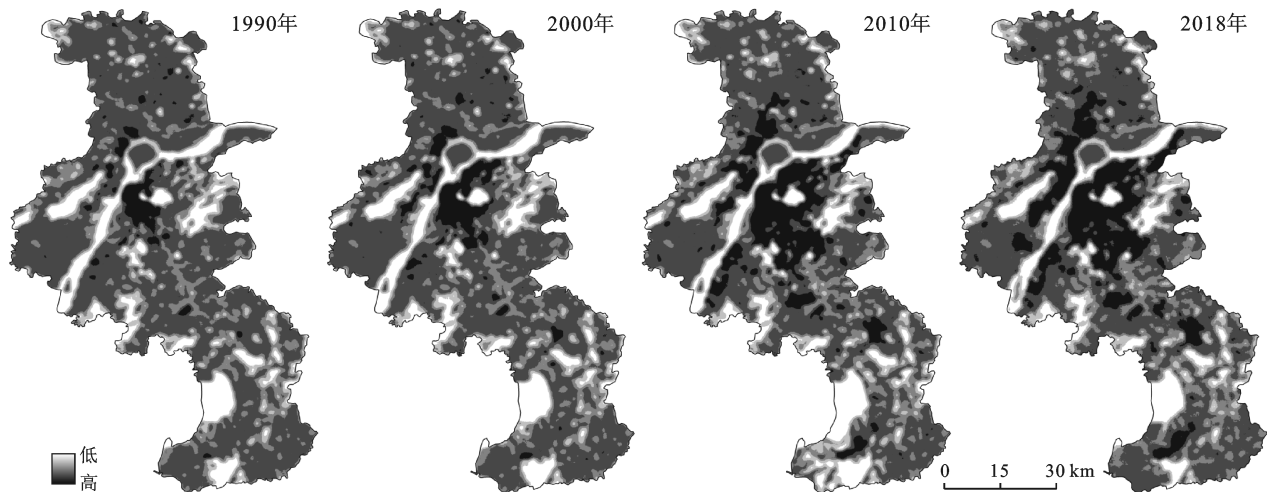


图 3 1990—2018 年南京市人为干扰综合强度分布特征

由图 3 可知,南京市生态系统人为综合干扰强度的空间分布主要有以下特征:北部以较高影响为主;中部以高影响为主;南部以低影响和较高影响为主,其中六合地区持续以较高影响为主,栖霞区、鼓楼区和玄武区均以高影响为主。从空间变化范围上看,在 2000—2018 年,南京地区中部的人为影响综合强度进一步增加,呈现出由中部向四周扩散的趋势,江宁区、溧水区的部分区域由较高影响发展为高影响。高淳区西南方向部分区域由低影响转变为中高影响。将此结果结合南京市 1990—2018 年土地利用分布(图 1)可知,耕地和建设用地区域的人为干扰程度较高,且高影响强度区域与建设用地扩张范围存在一致性,表明城市化的快速发展使人为干扰对生态系统服务的影响逐渐增强。

2.4.2 社会经济因素驱动力 本文利用 SPSS 软件对 19 组变量进行相关性分析和主成分分析,同时依据特征值来选定主成分(表 9)。由表 9 可知第一主成分的特征值为 17.745,其贡献率为 93.393%,第二主成分特征值为 1.15,其解释了总变异的 6.054%,第一、二主成分累积贡献率超过 99.9%,表明能够充分表达 19 组变量的信息,进而符合分析需求。由表 10 可知,总人口、人口密度、全部工业总产值、第一产业

景观样本的面积应当为斑块平均面积的 2~5 倍,才能够综合反映采样区周围景观的格局信息^[42]。

本文依据前人学者关于人为影响指数计算的研究^[29-31],在保证试验结果的精确性和可靠性的情况下,将研究区划分为若干个 500 m×500 m 的网格单元,分别计算各个景观单元的人为影响综合指数(HAI),利用 ArcGIS 软件进行 Kriging 插值得到 1990,2000,2010,2018 年这 4 个时期的人为干扰程度对比(图 3)。

值、城镇居民人均可支配收入、农村居民人均纯收入、实际利用外资额和第一主成分呈较强的正相关关系,农业人口、抚养比、人均粮食产量和第一主成分具有高度的负相关关系。第二主成分则与接待入境旅游人数具有相对较高的相关性。整体上来看,1990—2018 年南京市生态系统功能服务价值时空演变的驱动因素主要表现为人口、经济状况和居民生活水平。

表 9 1990—2018 年南京市社会经济因素驱动力特征值及主成分贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	17.745	93.393	93.393
2	1.15	6.054	99.447
3	0.105	0.553	100
其他	0	0	100

注:第 4—19 主成分的特征值、贡献率、累积贡献率均为 0,故表中将其省略。

3 结论

本文以快速城市化地区南京市为例,基于 4 期土地利用分类数据,研究了 1990—2018 年该地区土地利用的变化,估算了研究时段南京市的生态系统服务价值,从人为因素和社会经济因素两个角度评估了

生态系统服务价值时空演变驱动力因素。主要结论如下:

(1) 1990—2018年,南京市建设用地和耕地变化幅度较大,建设用地面积增加了105.67%,耕地面积减少了19.93%。总体来看,研究时段内南京市土地利用景观集中程度有所提高,多样性不断增强。

表10 1990—2018年南京市社会经济因素驱动力主成分载荷矩阵

主成分	第一主成分	第二主成分
总人口	0.999	-0.031
非农人口	0.995	-0.084
农业人口	-0.961	0.230
人口密度	1.000	-0.017
抚养比	-0.936	0.348
农业总产值	0.983	0.177
全部工业总产值	0.995	0.021
固定资产投资	0.990	-0.034
地区生产总值	0.963	0.270
人均地区生产总值	0.971	0.237
第一产业值	0.987	0.159
第二产业值	0.984	0.171
第三产业值	0.944	0.331
城镇居民人均可支配收入	0.982	0.188
农村居民人均纯收入	0.972	0.232
人均粮食产量	-0.956	0.269
城市化率	0.973	-0.199
接待入境旅游人数	0.744	-0.659
实际利用外资额	0.996	-0.080

(2) 研究期内南京市生态系统服务价值总体呈下降趋势,水域是南京市生态服务价值最高的土地利用类型。其中,2000—2010年南京市总的生态系统功能服务价值随着水域面积增加而有所提高,其中废物处理、水文调节和土壤保持等功能方面表现突出。

(3) 从驱动力分析来看,人为干扰因素使得耕地、建设用地以及水域受到了高影响和较高影响。随着南京市社会经济发展,人口对于生态系统服务价值时空变化的影响高于经济因素,人口因素日益成为影响南京市生态系统服务的主要驱动力。

(4) 快速城市化背景下南京市水域的面积发生显著变化,未来发展应注重保持现有的景观优势,优化城乡发展空间布局和城镇体系结构,提高水域的生态效益,维持生态系统的多样性,提升南京市总体生态系统服务功能价值。

[参 考 文 献]

[1] 黄敏,杨飞,郑士伟.中国城镇化进程对城市生态系统服务价值的影响[J].水土保持研究,2019,26(1):352-359.
[2] 胡其玉,陈松林.厦漳泉地区生态系统服务价值时空分布

格局演变[J].水土保持研究,2019,26(5):334-339.

- [3] 李文华,张彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):1-10.
[4] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(15):253-260.
[5] Daily G C. Natures Science: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997.
[6] 崔向慧.陆地生态系统服务功能及其价值评估:以中国荒漠生态系统为例[D].北京:中国林业科学研究院,2009.
[7] 李文华.生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M].北京:中国人民大学出版社,2008.
[8] 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):5963-5972.
[9] 幸赞品,颜长珍,冯坤,等.1975—2015年甘肃省白龙江流域自然保护区生态系统服务价值及其时空差异[J].中国沙漠,2019,39(3):172-182.
[10] 刘艳中,孙荣泽,陈章,等.临湘市“三生”用地变化及其生态系统服务价值响应[J].水土保持研究,2019,26(6):303-310.
[11] 虎陈霞,郭旭东,连纲,等.长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以嘉兴市为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):333-339.
[12] 孙思琦,郭涿,薛达元.重庆市巫山县土地利用格局及其生态系统服务价值的时空变化[J].生态科学,2019,38(1):176-185.
[13] Zhang Biao, Li Wenhua, Xie Gaodi. Ecosystem services research in China: Progress and perspective [J]. Ecological Economics, 2010,69(7):1389-1395.
[14] Yu Zhongyuan, Bi Hua. The key problems and future direction of ecosystem services research [J]. Energy Procedia, 2011,5(1):64-68.
[15] Sun Jian. Research advances and trends in ecosystem services and evaluation in China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011,10:1791-1796.
[16] 刘新卫,张定祥,陈百明.快速城镇化过程中的中国城镇土地利用特征[J].地理学报,2008,63(3):301-310.
[17] 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.
[18] 陈雯,闫东升,孙伟.长江三角洲新型城镇化发展问题与态势的判断[J].地理研究,2015,34(3):397-406.
[19] 孙志.新型城镇化背景下南京市土地供给对策研究[D].江苏南京:南京农业大学,2015.
[20] 汪东川,孙志超,孙然好,等.京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变[J].生态环境学报,2019,28(7):1285-1296.
[21] 魏彦昌,吴炳方,张喜旺,等.基于高分辨率影像的景观

- 格局定量分析[J].国土资源遥感,2009,22(2):76-81.
- [22] 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.
- [23] 欧阳志云,王效科,苗鸿,等.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[J].生态学报,1999,19(5):607-613.
- [24] 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.
- [25] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [26] 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.
- [27] 赵小汎.土地利用生态服务价值指标体系评估结果比较研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(1):98-105.
- [28] 李文楷,李天宏,钱征寒.深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响[J].自然资源学报,2008,23(3):440-446.
- [29] 陈浮,葛小平,陈刚,等.城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究[J].地理科学,2001,21(3):210-216.
- [30] 李杨帆,朱晓东,孙翔,等.快速城市化对区域生态环境影响的时空过程及评价[J].环境科学学报,2007,27(12):2060-2066.
- [31] 陈志强,陈健飞.闽台土地利用/覆被人为影响指数的地统计分析[J].热带地理,2008,28(6):518-522.
- [32] 赵志刚,余德,韩成云,等.鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J].生态学报,2017,37(24):8411-8421.
- [33] 曾杰,李江风,姚小薇.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.
- [34] 徐媛银,郭沛,薛达元,等.赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J].生态学报,2019,39(6):1969-1978.
- [35] 茆长宝,陈勇.土地利用及其生态服务价值演变的驱动力与预测研究:以江苏省为例[J].水土保持研究,2010,17(4):270-275.
- [36] 马晓勇,党晋华,李晓婷,等.太原市近 15 年城市景观格局时空变化及其驱动力[J].水土保持通报,2018,38(4):308-317.
- [37] 汪权方,杨宇琪,陈龙跃.近 30 年南京市水域消长及其原因分析[J].中国农业信息,2019,31(2):110-119.
- [38] 张骞,高明,杨乐,等.1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化[J].生态学报,2017,37(2):566-575.
- [39] 赵可,张雄,张炳信.城市化与城市建设用地关系实证:基于中国大陆地区 1982—2011 年时序数据[J].华中农业大学学报(社会科学版),2014,33(2):107-113.
- [40] Yang Zhaoping, Gao Jixi, Zhou Caiping, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its relation with climatic variables in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011,21(6):979-993.
- [41] 孙洪波,杨桂山,万容容,等.昆山生态系统服务价值变化及其驱动力差异性分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(4):760-762.
- [42] O'Neill R V, Hunsaker C T, Timmins S P, et al. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale [J]. Landscape Ecology, 1996,11(3):169-180.

(上接第 295 页)

- [10] 周子琴,苏维词,郑群威.2007—2016 年贵州省水资源生态足迹的演化特征[J].水土保持通报,2019,39(2):227-233.
- [11] 宋亚洲,韩宝平,朱国平,等.基于生态足迹的江苏省渔业资源可持续利用评价[J].水生态学杂志,2010,31(2):17-22.
- [12] 张天海,刘刚,唐立娜,等.基于时间序列计算的厦门市生态足迹动态研究[J].安全与环境学报,2018,18(2):800-806.
- [13] 焦士兴.河南省水生态足迹测度及其驱动效应分析[J].水文,2020,40(1):91-96.
- [14] 朱晔亭,宁立波,孙丽苹,等.安阳市地热开发区浅层地下水生态足迹研究[J].湖南师范大学学报(自然科学版),2018,41(3):9-15.
- [15] 吕金波.以水为魂的首都城市:北京[J].化石,2020(1):46-50.
- [16] 王洪波.基于改进型生态足迹模型的北京市生态足迹分析与评价[D].北京:首都经济贸易大学,2013.
- [17] 焦士兴,陈林芳,王安周,等.中原城市群水资源生态足迹变化及驱动研究[J].人民黄河,2020,11:124-128.
- [18] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等.水资源生态足迹计算方法[J].生态学报,2008,28(3):1279-1286.
- [19] 雷亚君,张永福,张敏惠,等.新疆水资源生态足迹核算与预测[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):142-150.
- [20] 李玉平,王晓妍,朱琛,等.邢台市水资源生态足迹核算与预测研究[J].水土保持研究,2014,21(3):227-230.
- [21] 王先庆,李博,李进,等.基于生态足迹模型的水资源可持续利用分析[J].人民长江,2019,50(5):107-112.
- [22] 张军,张仁陟,周冬梅.基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J].草业学报,2012,21(4):267-274.
- [23] 庄庆威,吴世新,罗格平,等.新疆绿洲变化与资源配置协调性分析[J].干旱区地理,2020,43(5):1298-1306.
- [24] 张军,周冬梅,张仁陟.黑河流域 2004—2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1779-1785.