

基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值 评估及时空演变特征研究

姜晗 吴群¹

(南京农业大学 公共管理学院, 江苏 南京 210095)

【摘要】: 基于江苏省 2005、2010、2015、2018 年 4 期土地利用/覆被变化 (LUCC) 遥感影像解译数据, 采用生态系统二级分类的当量因子定量评估江苏省生态系统服务总价值及单项生态服务功能价值, 运用空间自相关分析法探究各县级单位生态服务价值变化的时空格局演变特征。结果表明: (1) 2005~2018 年江苏省耕地、林地、草地面积减少, 湿地、建设用地、未利用地面积增加, 各时期耕地、湿地、建设用地面积的增减主导着区域土地利用变化。(2) 2005~2018 年江苏省生态系统服务总价值增加了 60.0762×10^8 元, 水文调节为主导生态服务功能, 保持湿地面积不仅主导着生态系统服务总价值变化, 也是维系水文调节服务价值、保障区域生态安全的关键。(3) 历年各县级单位的地均 ESV 整体呈较显著的空间正相关, 并表现为局部空间上的集聚。高值集聚区时空格局演变保持稳定, 而城镇化发展致使建设用地大量占用耕地和林地、区域性卓有成效的湿地保护和恢复工作是导致低值集聚区演变、地均 ESV 变化量空间分异特征的重要原因。研究结果可为江苏省制定科学合理的生态保护政策、建立生态保护修复的长效机制提供科学依据。

【关键词】: 土地利用/覆被变化 生态系统服务价值 时空演变特征

【中图分类号】: X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)11-2712-14

生态系统服务是指人类通过生态系统直接或间接地获取生存与发展所需要的所有福利, 包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务^[1]。工业革命以来, 工业化、城市化飞速发展, 由于人类对生态系统服务缺乏充分的认识和思考, 以牺牲环境为代价, 通过对资源的过度消耗以及对土地的过度开发来追求直观的经济效益, 却忽视了由此引发的诸如生物多样性丧失、自然灾害频发和土地荒漠化等一系列生态环境问题^[2], 导致全球性和区域性的生态危机日益凸显, 生态系统的服务功能迅速衰退, 严重威胁人类可持续发展的生态基础^[3]。土地利用/覆被变化 (Land Use and Land Cover Change, 简称 LUCC) 不仅是全球环境变化研究的核心领域和土地可持续利用研究的重要课题, 也是决定生态系统服务功能整体状况及其空间差异的重要因素^[4], 研究基于 LUCC 的生态系统服务价值评估, 有助于为优化土地利用空间格局、促进人与自然和谐发展、科学合理的制定生态保护政策提供科学依据。

为了更加直观的量化生态服务功能退化造成的经济损失, 1997 年 Costanza 等^[5]基于 17 种生态系统服务功能, 最终得到全球生态系统服务价值, 其估算的方法和原理奠定了今后生态系统服务价值量化评估的基础, 并使其成为生态环境研究领域的热点。目前国外已在不同尺度的生态系统服务价值评估体系及不同类型的评估模型方法等方面取得了许多重要的成果^[6, 7, 8, 9, 10, 11]。国内对生态系统服务价值的相关研究较之国外起步较晚, 但发展很快。在评估方法上, 欧阳志云等^[12]通过综合运用生态学和经济学的研究方法, 阐释了生态系统服务的功能和评价方法, 并对我国陆地生态系统服务价值进行了初步评估; 谢高地等^[13]在 Costanza

作者简介: 姜晗 (1992~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土地经济与管理。E-mail: 2016209013@njau.edu.cn; 吴群, E-mail: wuqun@njau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (71233004)

等研究的基础上,对我国自然草地生态系统及青藏高原生态资产的价值进行评估,制定了中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表并得到了广泛应用,为国内许多与LUCC相关的生态系统服务价值研究^[2,3,4,14,15,16,17,18,19,20,21]提供了重要参考;此后,谢高地等^[22]又对生态系统服务价值当量因子表进行了修订和补充,实现了对全国14种生态系统二级类型及其11类生态服务功能在时空尺度上的动态综合评估,推动国内相关研究^[23,24]进入了一个新的阶段。在研究内容上,涵盖了国际^[25]、全国^[12,22]、省^[4,16]、市^[3,14,23,24]、区域^[2,15,17,19]、流域^[18,20,21]等不同的研究尺度,随着GIS和RS技术的快速发展,从最初单一的各土地利用类型和各项生态服务功能的生态系统服务价值综合评估,逐步过渡到基于空间地统计学分析方法的生态系统服务价值变化时空演变特征研究,揭示其时空分异规律。

江苏省地处长江下游,亦是中国经济区——长江三角洲的重要组成部分,对维系整个长江经济带的生态安全及区域社会经济可持续发展具有十分重要的作用。近年来随着江苏省经济发展与生态保护的矛盾愈加突出,区域生态环境分化趋势显现,部分地区生态系统稳定性和服务功能下降,生态安全呈现出复杂多变、风险加剧、影响深远的总体态势^[26]。当前有关江苏省生态系统服务价值的研究多侧重基于不同模型的价值估算^[27,28],不仅研究尺度偏大,且缺乏基于空间地统计学分析方法的时空演变特征研究,致使研究结论比较粗糙。因此,基于江苏省LUCC数据,运用当量因子法科学评估江苏省生态系统服务总价值和各单项生态服务功能价值,并基于空间自相关法定量描述各县级单位生态系统服务价值及其变化的时空演变特征,对促进江苏省自然资源的合理开发和可持续利用、加强区域生态文明建设、建立生态保护修复的长效机制具有重要意义。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

江苏省介于 $116^{\circ}18'E\sim 121^{\circ}57'E$, $30^{\circ}45'N\sim 35^{\circ}20'N$ 之间,位于中国东部沿海,地跨长江、淮河,东临黄海、太平洋,与浙江、安徽、山东、上海接壤,地形以平原为主,下辖13个地级市,总面积 10.72 万 km^2 。江苏省四季气候分明,以淮河、苏北灌溉总渠一线为界,以北属暖温带湿润、半湿润季风气候,以南属亚热带湿润季风气候。年均降水量 1000 mm左右。至2018年末,全省常住人口 8050.7 万人,地区生产总值 92595.4 亿元。



图1 研究区概况图

1.2 数据来源

本研究采用的基础数据为江苏省2005、2010、2015、2018年4期LandsatTM遥感影像数据(数据来源于地理空间数据云平

台: <http://www.gscloud.cn>)。首先利用 ERDAS 软件对遥感影像进行处理: (1) 预处理 (包括波段选择与融合、降噪处理、消除阴影、减弱云雾等); (2) 几何纠正 (包括图像配准和几何精纠正, 使得遥感数据能够准确定位到特定的地理坐标系中); (3) 图像增强 (包括彩色合成、直方图变换、邻域增强等, 使得遥感影像所包含的地物信息可读性更强, 感兴趣的目标更加突出)。然后参考国际 LUCC 项目的分类标准, 结合我国《土地利用现状分类(GB/T21010-2017)》和江苏省土地利用实际情况, 将江苏省土地利用类型划分为 6 类: 耕地、林地、草地、湿地、建设用地和未利用地, 并通过 ArcGIS 软件平台, 采用人工目视解译与计算机监督分类相结合的方法, 识别目标地物的类型特征、空间位置等信息, 得到 4 期江苏省土地利用数据 (空间分辨率为 30m×30m)。

为了确保土地分类结果的准确性, 需对江苏省土地利用遥感制图进行精度评价。首先, 利用 ArcGis 中的 Generate 模块, 在研究区内按照不同的采样间距生成采样点; 然后, 将采样点图层分别与土地利用遥感制图和 Google Earth 高分辨率遥感影像进行叠加分析, 获取每个采样点的遥感分类结果和 Google Earth 判读信息; 最后, 基于上述分析结果, 在 6 个一级分类层面建立混淆矩阵, 计算遥感分类的总体精度。结果显示, 4 期土地利用遥感分类的总体精度均大于 85%, 符合研究所需的精度要求。

1.3 研究方法

1.3.1 单一土地利用动态度

单一土地利用动态度反映了某研究区在一定时间范围内某种土地利用类型数量变化的速度和幅度^[14,16]。计算公式如下:

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

式中: K 为某种土地利用类型的动态度; U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期某种土地利用类型的面积; T 为研究时段长。

1.3.2 生态系统服务价值研究

本研究通过计算江苏省 1 个标准单位生态系统服务价值当量因子的经济价值量, 并结合江苏省实际情况修正生态系统服务价值系数, 最终得到江苏省各土地利用类型生态系统服务单价和总价值。

(1) 1 个标准单位生态服务价值当量因子经济价值量的计算

1 个标准单位生态服务价值当量因子 (简称标准当量) 是指全国农田平均每年单位面积自然粮食产量的经济价值, 具有量化不同类型生态系统对生态服务功能的潜在贡献能力的作用^[2]。根据已有研究, 确定 1 个标准当量的经济价值量等于当年全国平均粮食单产市场价值的 1/7^[2]。计算公式如下:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (2)$$

式中: E_a 为单位农田生态系统提供生产服务功能的经济价值 (元/hm²); i 为作物种类, 江苏省的主要作物有稻谷、小麦、玉米; p_i 为 i 种粮食作物的全国平均市场价格 (元/t); q_i 为 i 种粮食作物单产 (t/hm²); m_i 为 i 种粮食作物面积 (hm²); M 为 n 种粮食作物总面积 (hm²)。

本研究通过参考《江苏统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》，统计 2005~2018 年江苏省稻谷、小麦、玉米 3 种主要农作物的单产、播种面积、平均出售价格等数据，得到江苏省 1 个标准当量的经济价值量为 1966.04 元/hm²。

(2) 生态系统服务价值系数的修正

本研究基于谢高地等^[22]最新修订的适合中国国情的单位面积生态系统服务价值当量因子表，依托其包括供给服务、调节服务、支持服务、文化服务 4 个一级类和 11 个二级类的生态服务分类体系，结合江苏省实际情况，对各生态系统的服务价值系数进行修正。

其中，耕地包括旱地和水田两个二级地类，分别对应旱地和水田的系数值；湿地包括河渠湖泊、水库坑塘、滩涂滩地、沼泽地等，对应湿地的系数值；草地对应灌草丛的系数值；未利用地包括盐碱地、裸地等，植被生产力很低，对应裸地的系数值；城乡建设用地主要包括城乡居民点、工矿用地和交通用地，其生态服务价值影响范围和程度很小，且现有研究尚未获得将建设用地生态服务价值完全量化的方法，因此将其系数设为 0；林地结构以针叶林、阔叶林、针阔混交林为主，参考郑刚等^[29]、倪健忠^[30]的研究成果，2005 年，江苏省针叶林、阔叶林和针阔混交林的面积比为 11：84：5，后来由于杨树造林面积大幅度增加，至 2010 年 3 种林地的面积比变为 8：89：3，并一直稳定这个比例到 2015 年。由于 2015~2018 年时间跨度不大，因此本研究认为 2018 年江苏省针叶林、阔叶林、针阔混交林的面积比与 2015 年相同，仍为 8：89：3。以面积比例为权重，采用针叶林、阔叶林、针阔混交林系数值的加权和，作为江苏省林地生态系统服务价值系数。

表 1 江苏省不同土地利用类型的生态系统服务价值系数

一级类型	二级类型	耕地		林地		草地	湿地	建设用地	未利用地
		旱地	水田	2005 年	2010、2015 和 2018 年				
供给服务	食物生产	1671.13	2673.81	556.98	560.32	747.10	1002.68	0.00	0.00
	原料生产	786.42	176.94	1272.22	1278.52	1100.98	983.02	0.00	0.00
	水资源供给	39.32	-5170.69	656.26	659.21	609.47	5092.04	0.00	0.00
调节服务	气体调节	1317.25	2182.30	4182.36	4203.00	3873.10	3735.48	0.00	39.32
	气候调节	707.77	1120.64	12522.10	12585.61	10243.07	7077.74	0.00	0.00
	净化环境	196.60	334.23	3705.20	3728.79	3381.59	7077.74	0.00	196.60
	水文调节	530.83	5347.63	8895.35	9026.29	7510.27	47637.15	0.00	58.98
支持服务	土壤保持	2025.02	19.66	5103.05	5129.59	4718.50	4541.55	0.00	39.32
	维持养分循环	235.92	373.55	386.52	388.10	353.89	353.89	0.00	0.00
	生物多样性	255.59	412.87	4642.21	4666.00	4285.97	15472.73	0.00	39.32
文化服务	美学景观	117.96	176.94	2039.96	2050.97	1887.40	9299.37	0.00	19.66

(3) 生态系统服务价值测算

本研究采用 Costanza 等^[6]提出的生态服务价值计算模型, 计算各项服务功能价值和生态系统服务总价值。计算公式如下:

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \quad (3)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (4)$$

式中: ESV 为生态系统服务总价值; A_k 为第 k 种土地利用类型面积; VC_k 为第 k 种土地利用类型的生态系统服务价值系数; ESV_f 为生态系统第 f 项服务功能价值; VC_{fk} 为第 k 种土地利用类型的第 f 项服务功能价值系数。

1.3.3 敏感性分析

为了验证修订后的江苏省不同土地利用类型生态系统服务价值系数的准确性及生态系统类型与土地利用变化的关联程度, 本研究利用敏感性指数 (CS), 来反映生态系统服务价值对生态价值系数的依赖程度^[4,20,21]。计算公式如下:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (5)$$

式中: CS 为生态服务价值敏感型指数; ESV_i 、 ESV_j 分别为生态价值系数调整前后的价值总量; VC_i 、 VC_j 分别为调整前后的生态价值系数; k 为某种土地利用类型。

CS 是指 VC 变动 1% 引起 ESV 的变化情况。如果 $CS > 1$, 表明 ESV 对 VC 是富有弹性的, 即 1% 的自变量变动将引起应变量大于 1% 的变动, 结果可信度低; 如果 $CS < 1$, 表明 ESV 对 VC 是缺乏弹性的, 结果是可信的。

1.3.4 空间自相关分析

(1) 全局 Moran' sI 指数

为进一步对江苏省生态系统服务价值及其变化的空间分布不均衡性进行研究, 引入全局 Moran' sI 指数, 用于反映空间相邻或相近的区域单元观测值在整个研究区域内的相关性和差异程度^[18]。计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n W_{kl} (X_k - \bar{X}) (X_l - \bar{X})}{S^2 \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n W_{kl}} \quad (6)$$

式中: X_k 为区域 k 的观测值; X_l 为区域 l 的观测值; \bar{X} 为观测均值; W_{kl} 为空间权重, 空间相邻为 1, 不相邻为 0。全局 Moran' sI 指数的取值范围是 $[-1, 1]$ 。

(2) 局部 Moran' sI 指数

局部 Moran' sI 指数是度量某一区域单元与相邻区域单元空间自相关程度的常用指标^[18],可进一步体现江苏省生态系统服务价值及其变化在局部空间的分布特征。计算公式如下:

$$I_k = Z_k^t \sum_{i=1}^n W_{ki} Z_i^t \quad (7)$$

式中: Z_k^t 和 Z_i^t 为区域 k 和 i 上观测值的标准化; W_{ki} 为空间权重, 其中 $\sum_{i=1}^n W_{ki} = 1$ 。

2 结果分析

2.1 土地利用变化分析

表 2 系统反映了 2005~2018 年江苏省土地利用状况及其变化。可知江苏省土地利用类型以耕地为主, 均占土地总面积的 60% 以上, 这是因为江苏省拥有以平原为主的地形、温暖湿润的气候、肥沃的土壤、充足的水源等优越的自然条件, 是我国重要的粮食主产区。2005 年耕地面积最大, 为 $6856.0592 \times 10^3 \text{hm}^2$, 占土地总面积的 66.3026%。

整个研究期内, 江苏省土地利用变化总体表现为耕地、林地、草地面积减少, 湿地、建设用地面积增加(未利用地因面积太少不参与讨论), 并在不同时间段呈现出阶段性特征。2005~2010 年, 江苏省经济持续快速发展, 人民群众生活水平普遍提高, 城镇化水平进入高速发展时期, 导致耕地面积出现较大幅度下滑, 减少量达 $460.6657 \times 10^3 \text{hm}^2$, 林地、草地面积也出现不同程度的减少, 建设用地面积则出现较大幅度增加, 增加量达 $438.6680 \times 10^3 \text{hm}^2$, 土地利用动态度达 5.6048%; 2010~2015 年, 随着江苏省城镇化的快速推进, 土地供需矛盾日趋尖锐, 耕地保护压力与日俱增, 政府在这一时期不断深化耕地保护的科学内涵, 完善城市发展规划, 严格控制建设占用耕地, 防止城市的盲目扩张对生态环境的破坏, 使得这一时期的耕地、林地、草地面积均出现不同程度的增加, 湿地、建设用地面积则有所减少; 2015~2018 年, 虽然江苏省陆续出台了若干耕地保护政策, 耕地保护补偿激励机制也日趋完善, 但在经济快速、高质量发展的大背景下, 耕地、林地、草地面积仍在减少, 且相比 2005~2010 年, 3 种地类的减少幅度均增大, 土地利用动态度分别为 -1.5720%、-2.7860%、-8.2512%, 此外江苏省在这一时期先后出台了《江苏省湿地保护修复制度实施方案》、《江苏省生态河湖行动计划》等促进湿地生态文明建设的文件, 致使湿地面积大幅增加, 土地利用动态度高达 3.3476%, 但仍低于建设用地面积的增加幅度。

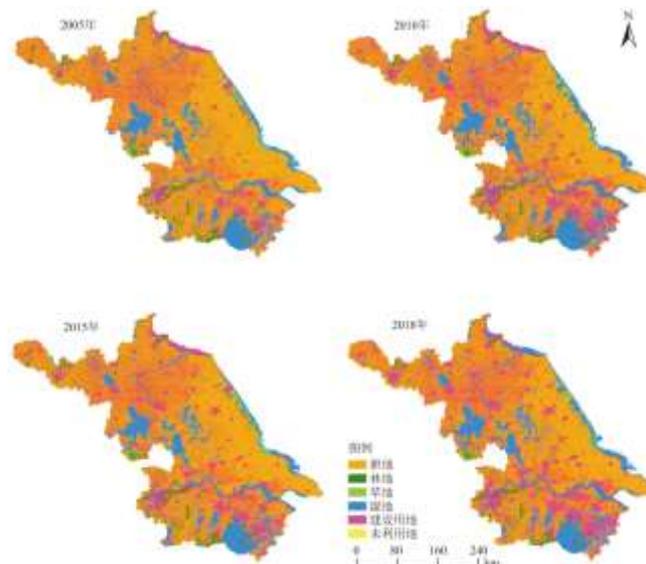


图 2 2005~2018 年江苏省土地利用类型图

表 2 2005~2018 年土地利用类型变化

年份	指标	土地利用类型					
		耕地	林地	草地	湿地	建设用地	未利用地
2005	面积(10^3hm^2)	6856.0592	339.8258	140.2091	1437.4368	1565.3201	1.7033
	比例(%)	66.3026	3.2863	1.3559	13.9010	15.1377	0.0165
2010	面积(10^3hm^2)	6395.3935	313.7346	93.5325	1512.4974	2003.9881	21.5643
	比例(%)	61.8468	3.0340	0.9045	14.6266	19.3796	0.2085
2015	面积(10^3hm^2)	6583.2753	333.6045	147.4627	1421.3182	1852.9467	1.8362
	比例(%)	63.6653	3.2262	1.4261	13.7452	17.9194	0.0178
2018	面积(10^3hm^2)	6272.8138	305.7222	110.9605	1564.0587	2079.3181	7.4029
	比例(%)	60.6639	2.9566	1.0731	15.1259	20.1089	0.0716
2005~2010	变化量(10^3hm^2)	-460.6657	-26.0912	-46.6766	75.0606	438.6680	19.8610
	动态度(%)	-1.3438	-1.5356	-6.6581	1.0444	5.6048	233.2061
2010~2015	变化量(10^3hm^2)	187.8818	19.8699	53.9302	-91.1792	-151.0414	-19.7281
	动态度(%)	0.5876	1.2667	11.5319	-1.2057	-1.5074	-18.2970
2015~2018	变化量(10^3hm^2)	-310.4615	-27.8823	-36.5022	142.7405	226.3714	5.5667
	动态度(%)	-1.5720	-2.7860	-8.2512	3.3476	4.0723	101.0547
2005~2018	变化量(10^3hm^2)	-583.2454	-34.1036	-29.2486	126.6219	513.9980	5.6996
	动态度(%)	-0.6544	-0.7720	-1.6047	0.6776	2.5259	25.7401

2.2 生态系统服务价值变化分析

2.2.1 生态系统服务总价值变化

2005~2018 年, 虽然江苏省耕地、林地和草地大部分转化为了建设用地, 导致湿地的面积增量远不及其它土地利用类型的面积减少量, 但由于湿地的单位面积生态服务价值过高, 因湿地面积变化而增加的生态系统服务价值量, 大于因耕地、林地和草地面积减少而损失的价值量, 使得江苏省生态系统服务总价值由 2005 年的 2204.1403×10^8 元上升到 2018 年的 2264.2165×10^8 元, 14 年间增加了 60.0762×10^8 元, 增加率为 2.7256%(表 3)。耕地和湿地两种土地利用类型对江苏省生态系统服务总价值的贡献最大, 贡献率达 90%以上。

表 3 2005~2018 年各类用地生态系统服务总价值及变化

年份	指标	土地利用类型						总计
		耕地	林地	草地	湿地	建设用地	未利用地	
2005	ESV (10 ⁸ 元)	530.3463	149.3950	54.2768	1470.1155	0	0.0067	2204.1403
2010		494.4236	138.9104	36.2077	1546.8825	0	0.0848	2216.5090
2015		509.3673	147.7081	57.0848	1453.6304	0	0.0072	2167.7978
2018		486.2543	135.3628	42.9543	1599.6160	0	0.0291	2264.2165
2005~2010	变化量 (10 ⁸ 元)	-35.9227	-10.4846	-18.0691	76.7670	0	0.0781	12.3687
	变化率 (%)	-6.7734	-7.0180	-33.2907	5.2218	0	1166.0661	0.5612
2010~2015	变化量 (10 ⁸ 元)	14.9437	8.7977	20.8771	-93.2521	0	-0.0776	-48.7112
	变化率 (%)	3.0225	6.3334	57.6593	-6.0284	0	-91.4851	-2.1977
2015~2018	变化量 (10 ⁸ 元)	-23.1130	-12.3453	-14.1305	145.9856	0	0.0219	96.4187
	变化率 (%)	-4.5376	-8.3579	-24.7535	10.0428	0	303.1664	4.4478
2005~2018	变化量 (10 ⁸ 元)	-44.0920	-14.0322	-11.3225	129.5005	0	0.0224	60.0762
	变化率 (%)	-8.3138	-9.3927	-20.8607	8.8089	0	334.6314	2.7256

2005~2010 年和 2015~2018 年这两个时期的土地利用类型变化与整个研究期相似, 均为耕地、林地和草地面积减少, 湿地面积增加且增量不及 3 种土地利用类型的减少量, 但生态系统服务总价值均有不同程度的增加, 增加量分别为 12.3687×10^8 和 96.4187×10^8 元, 其中湿地的增加量分别为 76.7670×10^8 和 145.9856×10^8 元; 而 2005~2010 年的情况与上述两个时期正相反, 表现为耕地、林地和草地面积增加, 湿地面积减少但减少量不及 3 种土地利用类型的增量, 生态系统服务总价值则减少了 48.7112×10^8 元, 减少率为 2.1997%, 其中湿地的减少量为 93.2521×10^8 元, 减少率达 6.0284%。综上可知, 湿地对于调节江苏省生态系统服务总价值具有至关重要的作用, 是改善区域生态环境、保障区域生态安全的关键因素。

2.2.2 单项生态服务功能价值变化

2005~2018 年的江苏省单项生态服务价值中, 除食物生产、气体调节、气候调节和维持养分循环有所减少外, 其他各项生态服务价值均有不同程度的增加, 且均呈波动变化态势(表 4)。其中水文调节服务价值最大, 远高于其他类型服务功能, 各年均占生态系统服务总价值的 43% 以上, 这主要因为湿地的水文调节功能非常强大, 其水文调节价值系数远高于其他地类的不同生态服务功能价值系数, 且江苏省湿地面积较大(仅次于耕地和建设用地)。原料生产、水资源供给和维持养分循环对生态系统服务总价值的贡献很低, 其中各年水资源供给价值均为负, 这主要因为水田为耗水系统, 其水资源供给价值系数为负, 各年因水田损耗的水资源供给价值, 大于旱地、林地、草地和湿地正向提供的水资源价值。食物生产、气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、生物多样性和美学景观对生态系统服务总价值的贡献适中, 其中减少量和减少率最高的均为食物生产, 分别为 16.9079×10^8 元和 9.6527%, 这主要因为江苏省经济的快速发展导致耕地面积减少; 增加量最高的是生物多样性, 为 14.0795×10^8 元, 美学景观的增加率最大, 达 6.1095%, 这主要因为两种服务功能的供给主体——湿地面积的增加。综上可知, 调节服务始终是江苏省土

地生态系统的主要功能，其中水文调节的贡献度最大，而保持湿地面积是维系水文调节服务价值、乃至整个生态系统服务总价值的关键。

表 4 2005~2018 年单项生态服务功能价值及变化

年份	指标	生态服务类型											总计
		食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观	
2005	ESV _t (10 ⁸ 元)	175.16 27	47.63 40	- 145.68 04	200.95 15	224.98 15	138.48 76	969.60 85	141.60 52	29.00 60	268.50 13	153.88 24	2204.14 03
2010		166.05 32	44.94 43	- 133.75 49	193.41 11	218.49 27	140.23 18	989.44 39	135.60 33	27.69 31	275.54 50	158.84 55	2216.50 90
2015		168.23 43	46.71 29	- 134.96 13	194.91 42	221.16 38	136.59 68	950.15 44	139.94 06	28.00 50	265.06 04	151.97 67	2167.79 78
2018		158.25 48	48.43 78	- 98.117 7	188.57 49	219.43 56	143.03 10	983.41 74	148.57 29	26.74 51	282.58 08	163.28 39	2264.21 65
2005 ~ 2010	变化量 (10 ⁸ 元)	- 9.1095	- 2.6897	11.9255	- 7.5404	- 6.4888	1.7442	19.8354	- 6.0019	- 1.3129	7.0437	4.9631	12.3687
	变化率 (%)	- 5.2006	- 5.6466	8.1861	- 3.7523	- 2.8841	1.2595	2.0457	- 4.2385	- 4.5263	2.6233	3.2253	0.5612
2010 ~ 2015	变化量 (10 ⁸ 元)	2.1811	1.7686	- 1.2064	1.5031	2.6711	- 3.6350	- 39.2895	4.3373	0.3119	- 10.4846	- 6.8688	- 48.7112
	变化率 (%)	1.3135	3.9351	- 0.9019	0.7772	1.2225	- 2.5921	- 3.9709	3.1985	1.1263	- 3.8050	- 4.3242	-2.1977
2015 ~ 2018	变化量 (10 ⁸ 元)	- 9.9795	1.7249	36.8436	- 6.3393	- 1.7282	6.4342	33.2630	8.6323	- 1.2599	17.5204	11.3072	96.4187
	变化率 (%)	- 5.9319	3.6926	27.2994	- 3.2524	- 0.7814	4.7104	3.5008	6.1685	- 4.498	6.6100	7.4401	4.4478

										8			
2005	变化量(10 ⁸ 元)	-16.9079	0.8038	47.5627	-12.3766	-5.5459	4.5434	13.8089	6.9677	-2.2609	14.0795	9.4015	60.0762
~2018	变化率(%)	-9.6527	1.6875	32.6487	-6.1590	-2.4650	3.2807	1.4242	4.9205	-7.7946	5.2437	6.1095	2.7256

2.3 敏感性分析

根据敏感性指数公式，将各地类 VC 值分别上下调整 50%，得到不同年份各地类的敏感性指数 CS(表 5)。可知，各地类的 CS 值大小依次为：湿地>耕地>林地>草地>未利用地，且 4 个时期不同地类的 CS 值均小于 1，其中 2018 年的湿地 CS 值最大，达 0.7065，即当湿地的 VC 增加或减少 1%时，生态系统服务总价值增加或减少 0.7065%；在不考虑未利用地的前提下(CS 值过小)，2010 年的草地 CS 值最小，仅为 0.0163。研究表明，研究区域生态系统服务总价值相对于 VC 的变化而言是缺乏弹性的，即使 VC 具有一定的不确定性，研究结果也是可信的。

2.4 相关指标的空间分异特征

2.4.1 全局空间自相关

以江苏省 96 个县级单位为研究单元，选取地均生态服务价值量(地均 ESV)和地均生态服务价值变化量(地均 ESV 变化量)两个指标，结合公式(6)，运用 ArcGIS10.2 软件计算得到不同年期相关指标的全局 Moran' sI 指数(表 6)，以探究相关指标空间分布的整体集聚特征。

由表 6 可知，江苏省 4 个年份各县级单位的地均 ESV 和地均 ESV 变化量的全局 Moran' sI 指数均在 1%水平上通过了显著性检验，且历年全局 Moran' sI 指数均大于 0。其中地均 ESV 呈较强的空间正相关性，在空间上整体表现为较显著的集聚分布格局，历年全局 Moran' sI 指数虽有增减但变化不大，2005~2010 年略微增加，之后呈小幅减少的变化态势，空间离散型初步显现，但整体空间集聚格局仍较为稳定；地均 ESV 变化量的空间正相关性较弱，历年全局 Moran' sI 指数均不高，Z 值仅略高于 1%显著水平下的临界值 2.58，整体空间集聚分布相较于地均 ESV 并不显著。因此接下来，对于地均 ESV 将继续运用局部 Moran' sI 指数揭示其局部空间集聚特征及演变规律；而对于地均 ESV 变化量将通过各时段的空间分布特征图，探究其空间分异规律。

表 5 不同土地利用类型生态系统服务价值敏感度

年份	敏感型指数 (CS)				
	耕地 (VC±50%)	林地 (VC±50%)	草地 (VC±50%)	湿地 (VC±50%)	未利用地 (VC±50%)
2005	0.2406	0.0678	0.0246	0.6670	3.0397E-06
2010	0.2231	0.0627	0.0163	0.6979	3.8258E-05
2015	0.2350	0.0681	0.0263	0.6706	3.3213E-06

2018	0.2147	0.0598	0.0190	0.7065	1.2852E-05
------	--------	--------	--------	--------	------------

表 6 相关指标的全局空间自相关

指标	地均 ESV				地均 ESV 变化量			
	2005	2010	2015	2018	2005~2010	2010~2015	2015~2018	2005~2018
全局 Moran' I	0.4191	0.4258	0.4100	0.3899	0.1409	0.1910	0.1550	0.1729
期望值	-0.0105	-0.0105	-0.0105	-0.0105	-0.0105	-0.0105	-0.0105	-0.0105
Z 得分	7.1970	7.2967	7.0513	6.7258	2.7023	3.6245	2.9127	3.1924
P 检验	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0069	0.0003	0.0036	0.0014

2.4.2 地均生态服务价值量的局部空间自相关

为进一步揭示地均 ESV 在局部空间的集聚特征及演变规律,在全局空间自相关结果的基础上,结合公式(7),运用 ArcGIS10.2 软件计算得到局部 Moran' sI 指数,并绘制局部空间集聚特征图(图 3)。

高值集聚区主要分布在苏南地区的无锡市(滨湖区、宜兴市)、苏州市(虎丘区、吴中区、相城区、姑苏区、吴江区、昆山市)一带,以及苏中地区的扬州市(宝应县)、苏北地区的淮安市(洪泽区、盱眙县、金湖县)、宿迁市(泗洪县)一带;低值集聚区主要分布在苏北地区的徐州市(鼓楼区、云龙区、铜山区)一带,以及苏北地区的淮安市(涟水县)、盐城市(响水县、滨海县)一带。产生这样的集聚特征主要是因为苏南地区是我国著名的“鱼米之乡”,其湿地资源相较于大部分苏中、苏北地区更加丰富,湿地面积比例更大,这一点在高值集聚区和低值集聚区之间尤为明显,高值集聚区历年湿地面积比例均在 35%以上,而低值集聚区在 2005、2010 和 2015 年的湿地面积比例均不到 2%,2018 年也仅仅刚过 3%,湿地面积比例相差悬殊是导致高低值集聚区产生的重要原因;此外,历年低值集聚区的建设用地面积比例几乎是高值集聚区的二倍,进一步拉大了高低值集聚区地均 ESV 的差距。

2005~2018 年,高值集聚区空间格局演变保持平稳态势,仅在数量上发生了微小调整;2005~2015 年,低值集聚区主要集中在涟水县、响水县一带,空间格局演变基本保持稳定,2015~2018 年,低值集聚区向更北部的鼓楼区、云龙区、铜山区一带演化。产生这样的演变规律主要是因为随着经济的快速发展,鼓楼区、云龙区的建设用地面积增幅很大,耕地、林地、草地却大幅减少,湿地面积则基本维持不变,导致地均 ESV 出现较大幅度减少,铜山区虽然地类面积变化并不显著,但由于 3 个市辖区原本的地均 ESV 就很低,因此演变成了低值集聚区。反观涟水县的地均 ESV 减少幅度较小,而响水县更是由于卓有成效的湿地保护工作,大幅增加了湿地面积,减少了建设用地面积,使得地均 ESV 大幅增加。

2.4.3 地均生态服务价值变化量的空间分布特征

结合 2005~2010、2010~2015、2015~2018、2005~2018 年 4 个时期各县级单位的地均 ESV 变化量,考察其空间分布特征(图 4)。

2005~2010 年,地均 ESV 增加的县级单位数量很少,且分布较为分散,不过增值显著地区(变化量>1000 元/hm²)较为集中,主要分布在苏中地区的高邮市、兴化市,以及苏北地区的大丰区、射阳县一带;地均 ESV 减少的县级单位大量且较集中分布于苏

南、苏北地区，尤以苏北地区最为集中，但多数县级单位损失值适中 ($-500 \text{ 元}/\text{hm}^2 < \text{变化量} < 0$)，这主要因为这一时期苏南、苏北地区的经济发展较为迅速，特别是苏北地区在江苏省的 GDP 占比逐年提高，大量耕地因城市扩张而被建设用地占用，不过耕地的损失量虽大，分布却较为平均，加之湿地面积的增长，因此形成了这样的局面。2010~2015 年，地均 ESV 增加的县级单位数量显著增加，主要集中分布在苏北地区，且大部分增值适中 ($500 \text{ 元}/\text{hm}^2 > \text{变化量} > 0$)，这主要因为作为粮食主产区的苏北地区为了遏制耕地被建设用地不断侵占的趋势，保障粮食安全，将部分建设用地转为了耕地，从而促进农业可持续发展；地均 ESV 减少的县级单位主要分布在江苏省中部和南部，值得注意的是在上一时期增值显著的高邮市一带，在这一时期全部为损失值显著地区 ($\text{变化量} < -1000 \text{ 元}/\text{hm}^2$)，这主要因为这一带的水库坑塘大量转化为了水田、草地、建设用地，导致地均 ESV 大幅减少。2015~2018 年，地均 ESV 增值适中的县级单位分布较为分散，而增值显著的县级单位主要分布在江苏省中部和东部沿海一带，这主要因为东部沿海一带由于高度重视湿地的保护利用工作，并加大投入对自然湿地和沿海滩涂湿地进行重点保护与恢复，使得湿地面积大幅增加，地均 ESV 大幅增加；地均 ESV 减少的县级单位数量有所增加，在苏南和苏北地区均有大量分布，这同样与因城镇化快速发展导致的建设用地占用耕地、林地密切相关。

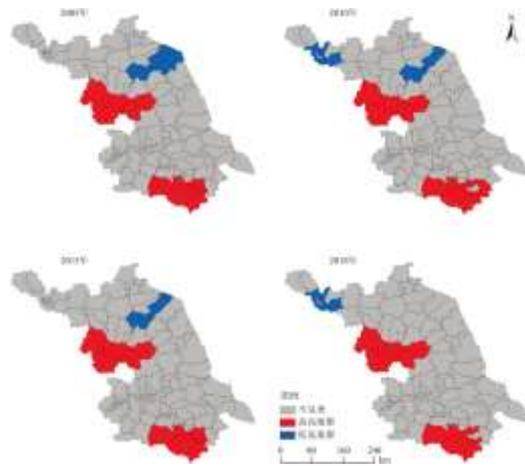


图 3 2005~2018 年地均 ESV 空间集聚分布特征

综合来看，2005~2018 年，地均 ESV 增值显著的县级单位的分布格局与 2015~2018 年基本一致，主要集中分布在江苏省中部和东部沿海一带，增值较高 ($1000 \text{ 元}/\text{hm}^2 > \text{变化量} > 500 \text{ 元}/\text{hm}^2$) 和增值适中的县级单位数量很少且分布较为分散；地均 ESV 减少的县级单位在苏南和苏北地区均有大量且集中的分布，其中损失值适中的县级单位主要分布在苏北地区，而苏南地区则集中了绝大多数损失值较高 ($-1000 \text{ 元}/\text{hm}^2 < \text{变化量} < -500 \text{ 元}/\text{hm}^2$) 和损失值显著的县级单位。

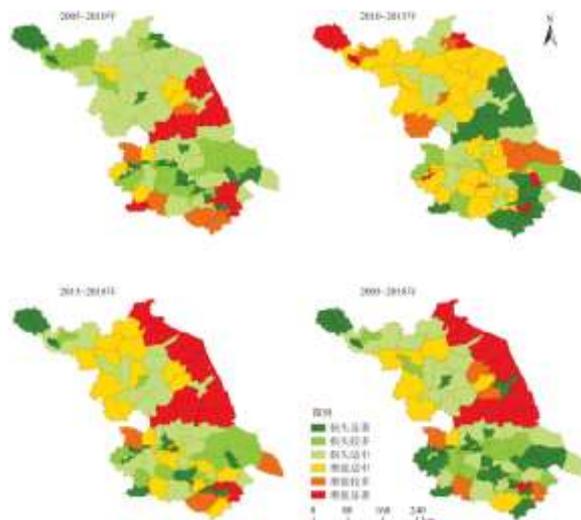


图 4 2005~2018 年地均 ESV 变化量空间分布特征

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 2005~2018 年, 江苏省土地利用/覆被变化较为显著, 总体表现为耕地、林地、草地面积减少, 湿地、建设用地面积增加, 其中耕地面积的减少量最大, 达 $583.2454 \times 10^3 \text{hm}^2$, 建设用地面积的增加量和增加幅度均最大, 分别为 $513.9980 \times 10^3 \text{hm}^2$ 和 2.5259%, 这与城镇化快速发展导致建设用地大量占用耕地、相关湿地保护政策的实施是分不开的。各时段不同土地利用类型均呈波动变化态势, 且变化幅度大小不一。

(2) 2005~2018 年, 江苏省生态系统服务总价值增加了 60.0762×10^8 元, 增加率为 2.7256%, 耕地和湿地的贡献最大, 贡献率达 90% 以上。其中湿地由于单位面积生态服务价值过高, 且各时段的湿地生态服务价值变化特征与江苏省生态系统服务总价值变化特征紧密相关, 成为改善区域生态环境、保障区域生态安全的关键。

2005~2018 年的单项生态服务价值中, 仅食物生产、气体调节、气候调节和维持养分循环有所减少, 其余均有不同程度的增加。其中原料生产、水资源供给和维持养分循环的贡献度很低; 水文调节的服务价值最大, 各年占比均在 43% 以上, 主要得益于湿地异常强大的水文调节功能, 而保持湿地面积是维系水文调节服务价值、乃至整个生态系统服务总价值的关键。

(3) 历年江苏省各县级单位的地均 ESV 整体呈较显著的空间正相关, 并表现为局部空间上的集聚。高值集聚区主要分布在苏南地区, 苏中、苏北地区也有少量分布, 低值集聚区主要分布在苏北地区, 湿地面积比例相差悬殊是导致高低集聚区产生的重要原因; 2005~2018 年, 高值集聚区的空间演变保持平稳, 而低值集聚区在 2015~2018 年向更北部的铜山区一带演化, 城镇化的飞速发展导致建设用地占用耕地、林地和草地的面积大幅增加是主要原因。

2005~2018 年, 地均 ESV 增值显著的县级单位集中分布在江苏省中部和东部沿海一带, 主要得益于卓有成效的湿地保护和恢复工作; 地均 ESV 损失较多和显著的县级单位大多集中分布在苏南地区。

3.2 讨论

为了进一步加强江苏省生态环境的保护工作, 促进各区域的社会、经济和生态协调发展, 提出如下对策建议:

(1) 严控建设用地占用耕地, 集约节约利用建设用地, 实行最严格的基本农田保护制度。①鼓励城市进行内部挖潜, 对城市内部低效用地、废弃地进行开发, 从而限制城市的无序扩张, 提高城市内部的集约利用水平。②对农村中废弃的、利用不合理的农村集体用地或工矿用地进行复垦, 从而增加耕地或其他农用地的面积, 优化农村用地空间布局。③加强高标准基本农田建设工程和土地整治工程的建设工作, 大力改造中低产田, 努力向耕地的“数量—质量—生态”三位一体的保护制度发展。

(2) 实现湿地资源的可持续利用。①完善湿地保护的制度化手段。对非法围湖造田、或其他任何非法破坏湿地资源的行为进行严惩。②加强水体污染的防治。由于江苏省湿地资源属于淡水系统, 因此加强水体污染的防治十分必要。需加快江苏省城市污水管网和污水处理厂的建设, 提高污水的收集和集中处理效率。还要积极调整和优化产业结构, 大力发展技术含量高、能够严控“三废”排放量的工矿企业。③相关科研单位应加强湿地理论与工程技术研究。主要开展湿地的水文和气候调节服务、保护生物多样性等生态与环境功能的定量分析, 和湿地生态风险与安全评价研究。④将湿地保护、恢复与重建、合理利用纳入城市土地利用规划, 使其成为城市基础设施建设的重要组成部分, 实现真正的生态城市建设。对因环境破坏、水土流失造成的湿地资源退化, 优先实施湿地恢复工程, 并在条件必要的情况下实施退耕还湖。在生态服务价值低值区和生态敏感区, 可因地制宜地建立湿

地公园和湿地保护带。

(3) 相关生态政策的完善与优化。①自上而下完善区域生态环境的绩效考核制度。上级政府需针对各县级单位的生态环境保护行为与措施,建立基于“3S”等先进技术的生态环境监测体系,并构建基于直接监管结果的绩效考核机制,同时需将考核结果与地区综合发展评估挂钩,以提升区县政府的生态环境保护积极性。②自下而上健全公众对区域生态环境的监督管理制度。政府应努力拓宽公众参与区域生态环境保护、治理的途径和渠道,并逐步制度化。例如,在生态治理的决策过程中举行听证会,吸纳利益相关者直接参与其中并充分吸取其意见,不仅保障公众对生态环境的知情权,还可有效推动生态保护与防治长效机制的建立。③加强区域间生态环境协同治理。生态系统服务具有明显的外部性,在生态服务高值集聚区,各区县存在“搭便车”的激励,在低值集聚区,各区县的生态环境保护积极性较差。因此,加强区域间生态环境保护协作十分重要。土地利用分类相似、生态关联性较强的区域应施行统一的生态环境保护规划,构建区域一体化的生态环境保护信息共享平台和生态环境质量监测体系,从而最大限度的集合资源以解决区域共性的生态问题,取得生态环境治理整体功能的最大成效。

本文通过对江苏省各用地类型及各项生态服务功能的生态服务价值进行科学的评估,并探究各县级单位生态服务价值变化的时空格局演变特征,可为改进区域土地利用规划管理、完善生态效益的绩效考核提供科学参考。相较于大部分同类文献仅采用土地利用类型的一级分类标准,且基于格网化进行时空格局演变特征分析,本文采用最新的生态系统二级类型的生态价值系数,并基于各县级单位进行时空格局演变特征分析,无疑使研究结果更加精确可靠,县级政府部门的决策依据更加清晰。但同时本文也存在如下不足之处:(1)未将建设用地的生态服务价值纳入计算,将其设定为0,但建设用地中的绿化带对区域生态服务功能的贡献十分重要,因此不能简单地将其生态服务价值忽略,需对其进行更深入的研究;(2)未对造成江苏省生态服务价值空间分布格局及其时空演变特征的驱动因素进行分析,未能揭示其内在影响机理,在后续的研究中有待进一步完善。

参考文献:

- [1]陈戉.湖北省土地生态服务价值时空分异及驱动因素研究[D].武汉:中国地质大学,2015.
- [2]陈万旭,李江风,朱丽君.长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J].自然资源学报,2019,34(2):325-337.
- [3]陈宏伟,许晶,刘娜,等.沈阳市城区绿地生态系统服务价值的时空变化[J].应用生态学报,2018,29(10):3391-3397.
- [4]熊鹰,张方明,龚长安,等.LUCC影响下湖南省生态系统服务价值时空演变[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1397-1408.
- [5]COSTANZA R,DARGE R,DE GROOT R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387(6630):253-260.
- [6]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.
- [7]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.
- [8]RADFORD K G,JAMES P.Changes in the value of ecosystem services along a rural-urban gradient:A case study of greater Manchester,UK[J].Landscape and Urban Planning,2013,109(1):117-127.

-
- [9] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26(1):152-158.
- [10] RICHARDSON L, LOOMIS J, KROEGER T, CASEY F. The role of benefit transfer in ecosystem service valuation[J]. *Ecological Economics*, 2015, 115:51-58.
- [11] AROWOLO A O, DENG X Z, OLATUNJI O A, OBAYELU A E. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636:597-609.
- [12] 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[J]. *生态学报*, 1999, 19(5):19-25.
- [13] 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(2):189-196.
- [14] 蒋晶, 田光进. 1988年至2005年北京生态服务价值对土地利用变化的响应[J]. *资源科学*, 2010, 32(7):1407-1416.
- [15] 吴大千, 刘建, 贺同利, 等. 基于土地利用变化的黄河三角洲生态服务价值损益分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8):256-261.
- [16] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 等. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(7):1053-1062.
- [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] 邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 等. 洞庭湖区土地生态系统的服务价值时空变化[J]. *地理研究*, 2019, 38(4):844-855.
- [19] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 等. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8):1654-1665.
- [20] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 近30年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(8):2973-2985.
- [21] 约日古丽卡斯木, 杨胜天, 孜比布拉·司马义. 新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2):260-269.
- [22] 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.
- [23] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. *生态学报*, 2019, 39(21):7815-7828.
- [24] 张丽琴, 渠丽萍, 吕春艳, 等. 基于空间格局视角的武汉市土地生态系统服务价值研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9):1988-1997.

-
- [25]赵景柱, 徐亚骏, 肖寒, 等. 基于可持续发展综合国力的生态系统服务评价研究——13个国家生态系统服务价值的测算[J]. 系统工程理论与实践, 2003(1):121-127.
- [26]丁宏. 江苏生态系统保护修复的路径选择[J]. 唯实, 2019(2):36-39.
- [27]陆黎娟, 逯跃锋, 曹蕾, 等. 基于 NPP 数据的江苏省生态价值时空格局分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(2):104-107.
- [28]束邱恺, 高永年, 刘友兆, 等. 江苏沿海地区土地利用生态价值测算评估[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6):787-796.
- [29]郑刚, 戎慧, 程小义, 等. 基于森林资源连续清查的江苏省森林资源动态变化分析[J]. 江苏林业科技, 2017, 44(2):43-47.
- [30]倪健忠. 江苏省 2005-2010 年森林资源动态变化[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.