

# 长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究

朱治州, 钟业喜\*

(江西师范大学地理与环境学院, 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022)

**摘要:** 采用 1990、2000、2010 和 2015 年四期长江三角洲城市群土地利用数据, 利用土地利用转移概率矩阵等方法, 描述了长江三角洲城市群的土地利用方式和转移方向, 采用谢高地等修正 Costanza 价值量评价法定量计算了区域内的生态系统服务价值, 并借助地理探测器对其空间分布格局进行了归因解释。研究表明: 长江三角洲城市群土地利用类型以耕地为主, 呈现逐年减少的趋势, 林地变化相对稳定, 水域变化先增后减, 建设用地持续增长且保留率最高, 耕地为其主要转化来源, 草地主要转化为耕地和林地, 水域主要转出为建设用地。1990、2000、2010 和 2015 年长江三角洲城市群的生态系统服务价值分别为 2 644.26、2 639.53、2 615.49 和 2 569.88 亿元, 总体呈逐渐下降趋势, 其中农田生态系统价值下降最多, 森林生态系统对整个区域的贡献率最大, III、IV 等级的城市的生态系统服务价值高于 I、II 等级, 且城市规模越大, 经济价值越占主导地位。空间分布格局形成以太湖和巢湖为中心的高值集聚区、东南地区高于西北地区的特征, 其受到坡度、高程、土壤类型、人口等因子的影响。

**关键词:** 土地利用变化; 生态系统服务价值; 空间分布; 长江三角洲城市群

中图分类号: F301.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2019)07-1520-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201907002

土地利用/土地覆被变化是区域自然环境对人类经济活动最直接的响应, 作为联系纽带密切联通着人类社会经济活动和地球陆表系统自然生态过程<sup>[1]</sup>。人类社会根据不同的发展需求, 驱动着区域自然环境发生变化, 使陆地表层表现出不同土地利用方式, 其对人类社会经济活动的重要响应和表现<sup>[2]</sup>。随着全球人口数量和富裕程度的增加, 对全球土地资源的需求也在增加, 但土地的健康和生产力正在恶化<sup>[3]</sup>, 而且土地利用变化作为全球环境变化中最明显的表现形式, 间接影响着气候变化、生物多样性、生物地球化学循环以及资源可持续利用等地表物质循环和生态过程<sup>[4]</sup>。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环境条件与效用, 人类能够通过生态系统的功能直接或间接得到的产品和服务, 其主要功能是供给功能、调节功能和文化功能, 以及对维持生态系统的其它功能<sup>[5]</sup>, 生

态系统的结构和功能随着土地利用变化而改变, 并体现为生态系统服务价值的演变。因此, 定量计算土地利用变化对生态系统服务功能的影响, 可作为评估土地变化生态环境效应的指标<sup>[6]</sup>。

目前, 关于生态服务价值的核算方法包括能值分析法、生态空间评价法、物质量评价法以及价值量评价法<sup>[7]</sup>, 其中 Constanza 等<sup>[8]</sup>提出的价值量评估模型受到学界的普遍认可和运用。国内学者谢高地等<sup>[9]</sup>结合中国生态系统类型和生态服务价值特征, 修订 Constanza 模型从而建立了符合中国实际的中国陆地生态系统单位面积服务价值表, 在国内区域各类生态系统服务价值评估研究中得到普遍运用, 如中国森林<sup>[10]</sup>、青海湖流域<sup>[11]</sup>、吉林省<sup>[12]</sup>、白洋淀湿地<sup>[13]</sup>等不同尺度区域的生态服务价值研究, 并且近年来不断修正改进。程建等<sup>[14]</sup>借助土地转移矩阵、土地利用程度分级指数及谢高地制定的当量因子等方法对长江

收稿日期: 2018-10-22; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目“城市群空间结构效应研究—以长江中游城市群为例”(41561025)

作者简介: 朱治州(1994~), 男, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与空间规划。E-mail: zzz3103@126.com

\* 通讯作者 E-mail: zhongyexi@126.com

流域土地利用与生态系统服务功能变化进行深入研究,从单位面积的生态服务价值的空间分布及单项生态服务功能价值等角度较全面地分析其时空变化,但时间跨度较小,在分析引起时间与空间分布的根本原因上略有不足。彭文甫等<sup>[15]</sup>采用生态系统服务价值评估模型、敏感性指数和价值变率模型等方法,对四川省各类生态系统的各项生态服务价值、土地利用变化及影响进行了计算和分析,但是空间分布仅从地级市的尺度分析,所呈现的尺度不够细化。胡和兵等<sup>[16]</sup>以南京市九乡河流域为研究区域,研究了城市化流域土地利用程度和生态系统服务价值时空变化特征以及它们之间的影响,然而其研究的时间跨度方面具有较大的局限性。Aisha等<sup>[17]</sup>根据2000年和2010年的土地利用数据和价值转移方法,定量的评估了尼日利亚土地利用/土地覆盖动态变化对生态系统服务价值的响应,并进行了深入分析,其认为引起生态系统服务价值变化的是耕地为主要因素,但未进一步地突出区域内部的差异性。区域的土地利用变化及其生态系统服务价值响应研究已受到国内外众多学者的关注,不断的提出各种测算数量模型和定量评估方法,并取得了一定的学术成果,然而目前研究大多存在较大的时间的局限性,在时间跨度的层面上略有欠缺,而且在空间分布差异方面呈现的不够细致,未全面地突出区域内部的差异性。

长江三角洲城市群是我国改革开放的前沿阵地,也是海陆统筹与“一带一路”建设的重要部分之一,近年来经济发展迅速。而作为经济发展的支撑要素,城市群的建城区土地扩展加剧,导致一系列生态问题和城市安全问题,例如大气污染<sup>[18,19]</sup>,水污染<sup>[20]</sup>,土壤重金属污染<sup>[21,22]</sup>等。鉴于此,本文以长江三角洲城市群这一土地利用变化速度较快的地区为研究对象,并在参照其他土地利用与生态系统服务研究的基础上,确立的适合该地区的土地利用类型变化与生态系统服务评估体系和空间分布格局及其驱动因素方法,结果可为长江三角洲城市群地区新型城镇化的深入推行以及生态与经济可持续发展提供一定参考价值。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域

长江三角洲城市群是目前中国开放程度最

高、经济发展最具活力、创新能力最强的区域之一。2016年5月国务院批准《长江三角洲城市群发展规划》<sup>[23]</sup>作为长三角城市群的指导性文件,规划中长三角城市群的范围包括:上海市,江苏省的南京、无锡、常州、苏州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州,浙江省的杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、金华、舟山、台州,安徽省的合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城等26个地级市,总面积为21.17 km<sup>2</sup>,本研究以此范围内地级市为研究单元而确定研究范围。对长江三角洲城市群的土地利用与生态服务研究,在促进城市群区域一体化、可持续化发展和长江三角洲城市群建设及“一带一路”战略实施等方面具有重要意义。

### 1.2 数据来源及预处理

本研究主要数据包括:刘纪远<sup>[24]</sup>在1:100万比例尺土地利用现状遥感监测数据基础上通过矢量数据栅格化生成的1990、2000、2010年的100 m栅格数据和2015年1 km栅格数据,以及1 km分辨率的人口、土壤类型和土壤侵蚀等数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。高程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>),坡度数据由其在ArcGIS中计算而得。从《上海市统计年鉴》、《江苏省统计年鉴》、《浙江省统计年鉴》、《安徽省统计年鉴》中查找各地市的地区生产总值,用以衡量生态与经济协调发展的指标。根据国家自然资源部发布的《土地利用现状分类》,结合长江三角洲城市群的土地利用方式特征,将其土地利用类型归并为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地等6个类型。

## 2 研究方法

土地利用变化主要包括各地类面积的增减及相互之间的转换,本研究将采用转移矩阵方法来定量表现土地之间的转换特征。土地利用转移矩阵方法来源于系统分析中对系统状态与转移的定量描述方式<sup>[25,26]</sup>,是刻画区域不同土地利用类型相互转化的方法,不但包含研究初和研究末用地类型的面积变化信息,而且可以直观地呈现区域土地利用变化的空间结构特征及其转移方向。

在生态系统服务价值核算方面将基于谢高地

等建立的中国陆地生态系统服务价值当量表, 结合长江三角洲城市群 1990~2015 年平均粮食单产, 并根据一个生态服务价值当量因子的经济价值量等于当年平均粮食单产市场价值的 1/7 规则<sup>[27]</sup>进行修正。为了保证数据的完整性, 本研究以农田—耕地、森林—林地、草地—草地、水体—水域、荒地、其他用地—荒漠的形式将不同土地利用类型与相应的生态系统类型对应<sup>[28]</sup>, 从而得到研究区各生态系统类型价值系数。生态系统服务价值评估以 Costanza 等的研究方法为基础, 对研究区内生态系统服务价值进行核算, 其表达式为:

$$ESV = \sum A_i \times VC_i$$

$$ESV_j = \sum A_i \times VC_{ij} \quad (1)$$

式中:  $ESV$  为该研究区域生态系统服务价值总量;  $ESV_j$  为第  $j$  项生态服务功能价值;  $VC_i$  为第  $i$  类生态系统对应的生态系统服务价值系数;  $VC_{ij}$  为第  $i$  类生态系统的第  $j$  项生态服务功能价值系数;  $A_i$  为第  $i$  类生态系统的面积 ( $\text{hm}^2$ )。

为了更加全面地分析区域内生态系统服务价值的驱动因素, 本位采用地理探测器方法, 分析多个因子对其驱动力的影响。地理探测器主要用于探测地理要素的差异性及其对研究对象空间分布的影响因素, 其包含 4 个探测器, 分别为因子探测、生态探测、风险探测和交互探测, 该方法由王劲峰团队提出并不断完善<sup>[29]</sup>。其特点为对变量非线性假设, 属于方差分析的范畴, 其值反映因子对研究对象解释的百分比  $100 \times q\%$ <sup>[30]</sup>。因子探测表达式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (2)$$

式中:  $q$  为生态系统服务价值影响因素探测力指标;  $N$  为整个区域样本数;  $N_h$  为次一级区域

样本数;  $L$  为次一级区域个数;  $\sigma^2$  为整个区域生态系统服务价值的方差;  $\sigma_h^2$  为次一级区域的方差。  $q$  取值在 0 到 1 之间,  $q$  值越大, 表示分区因素对生态系统服务价值空间分布影响越大, 反之则越小。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化动态分析

通过对 1990~2015 年四期土地利用数据的处理, 得到长江三角洲城市群各土地利用面积及其变化表(表 1)。从表中可以看出, 长江三角洲城市群土地利用类型以耕地为主, 但由于受人类生产生活的影 响, 使得耕地类型逐渐减少, 其面积由 1990 年的 114 999  $\text{km}^2$  减少到 2015 年的 103 721  $\text{km}^2$ , 年均减少约 0.39%。林地约占总体地类的 1/4, 在人类活动的开采与地方政策的恢复的双重影响下, 其变化保持相对稳定。草地的变化呈现先减后增的趋势, 草地的持续开垦使其在 1990~2010 年不断减少, 而后出现小幅度的增加现象与地方政策因素密不可分。与此同时, 水域却出现先增后减的变化, 城市的发展建设通常会修建人工湖泊, 水域得以小范围增加, 但终究抵不过人类生存空间需求的侵占而减少。近年来长江三角洲城市群经济快速发展, 建设用地持续显著增加, 且在 2010 年的左右首次超过水域面积。未利用地面积相当小, 占比不足 1%, 其主要为舟山群岛的沙滩, 变化相对稳定。

利用上述土地利用转移矩阵方法, 结合 ArcGIS 栅格计算器和栅格处理工具, 对 1990、2000、2010 和 2015 年四期土地利用数据分别进行代数叠加运算, 整理后得到 1990~2000、2000~2010、2010~2015 年 3 个时间段的土地利用转移概率矩阵(表 2)。

表 1 各土地利用面积及其变化 ( $\text{km}^2$ )

Tab. 1 Land use area and its change

土地利用类型	土地利用面积				1990~2000 年		2000~2010 年		2010~2015 年	
	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	变化面积	变化率 (%)	变化面积	变化率 (%)	变化面积	变化率 (%)
耕地	114 999	111 097	105 407	103 721	-3 901.34	-3.39	-5 690.75	-5.12	-1 685.57	-1.60
林地	57 448	57 742	57 427	56 780	293.38	0.51	-314.47	-0.54	-647.52	-1.13
草地	8 105	7 852	7 757	7 843	-252.47	-3.12	-95.22	-1.21	85.9	1.11
水域	19 138	19 509	19 938	19 364	370.68	1.94	428.71	2.20	-573.64	-2.88
建设用地	12 677	16 127	21 810	24 087	3 449.23	27.21	5 683.59	35.24	2 276.9	10.44
未利用地	46	34	36	33	-11.49	-25.07	1.22	3.55	-2.55	-7.17

表 2 土地利用转移概率矩阵(%)  
Tab. 2 Land use transfer probability matrix

研究时段	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1990~2000 年	耕地	87.30	3.89	0.35	1.71	6.67	0.00
	林地	6.86	90.59	1.63	0.35	0.44	0.02
	草地	7.66	9.32	77.98	3.05	1.46	0.02
	水域	8.41	1.17	0.72	88.18	0.99	0.00
	建设用地	4.96	1.37	0.19	1.19	92.02	0.00
	未利用地	4.14	1.16	2.99	2.55	2.90	87.98
2000~2010 年	耕地	94.60	0.05	0.00	0.64	4.69	0.00
	林地	0.10	99.31	0.10	0.04	0.45	0.00
	草地	0.52	0.33	97.61	1.03	0.41	0.02
	水域	0.92	0.03	0.12	97.91	1.02	0.00
	建设用地	0.09	0.01	0.00	0.09	99.71	0.00
	未利用地	0.00	0.67	0.00	0.00	8.91	90.60
2010~2015 年	耕地	94.70	1.45	1.31	0.91	1.42	0.02
	林地	0.54	96.56	0.87	1.21	0.09	0.03
	草地	2.52	8.68	83.40	1.72	2.40	0.02
	水域	1.15	3.09	2.63	86.38	5.11	0.02
	建设用地	2.07	1.31	0.74	1.74	93.69	0.02
	未利用地	6.02	3.20	2.70	3.99	6.97	73.97

在 1990~2000 年期间,建设用地的保留率最高,达到 92.02%,耕地为其主要转化来源;保留率最低的地类为草地,其 7.66% 转化为耕地和 9.32 转化为林地,主要因素为人类开垦荒地和植树造林;由于耕地总面积大,尽管有 8.41% 的水域转化为耕地,然而却抵不过耕地的 6.67% 转化为建设用地。在 2000~2010 年期间各土地类型保留率均较高,在 90% 以上,其中建设用地保留率为 99.71%,几乎未转化为其他地类,不仅如此,其他地类均不同程度地向建设用地转化,耕地和未利用地为其主要转化来源。在 2010~2015

年期间,未利用地保留率最低,仅有 73.91%,其主要转为耕地和建设用地,林地保留率最高,达到 96.56%,主要来源为草地,水域的保留率为 86.38%,主要转出为建设用地。

### 3.2 生态系统服务价值时间演变分析

#### 3.2.1 各生态系统类型价值分析

利用 ArcGIS 计算得到每个地市各土地利用类型的面积,结合对应的生态系统服务价值系数,由公式(2) 计算得到 1990~2015 年四期长江三角洲城市群的生态系统服务价值及其变化情况(表 3)。

表 3 各类生态系统服务价值变化(亿元)  
Tab. 3 Changes in the value of ecosystem services for various land types

生态系统类型	农田	森林	草地	水体	荒漠	合计	
ESV(亿元)	1990	703.14	1 110.71	51.92	778.48	0.02	2 644.26
	2000	679.28	1 116.38	50.31	793.55	0.01	2 639.53
	2010	644.49	1 110.30	49.70	810.99	0.01	2 615.49
	2015	634.18	1 097.78	50.25	787.66	0.01	2 569.88
贡献率(%)	1990	26.59	42.00	1.96	29.44	0.00	100
	2000	25.73	42.29	1.91	30.06	0.00	100
	2010	24.64	42.45	1.90	31.01	0.00	100
	2015	24.68	42.72	1.96	30.65	0.00	100
变化率(%)	1990~2000	-0.03	0.01	-0.03	0.02	-0.25	-0.18
	2000~2010	-0.05	-0.01	-0.01	0.02	0.04	-0.91
	2010~2015	-0.02	-0.01	0.01	-0.03	-0.07	-1.74
	1990~2015	-9.81	-1.16	-3.23	1.18	-27.97	-2.81

从表中可以看出,1990、2000、2010 和 2015 年长江三角洲城市群的生态系统服务价值分别为 2 644.26、2 639.53、2 615.49 和 2 569.88 亿元,总体呈逐渐下降趋势,共减少 74.38 亿元。1990~2000 年其生态系统服务价值下降 4.73 亿元,其中农田生态系统价值下降最快,减少 23.85 亿元;水体和森林生态系统的价值呈上升状态,分别增长 15.08 和 5.67 亿元。2000~2010 年研究区内生态系统服务价值减少 24.05 亿元;下降最快的仍是农田生态系统价值,减少 34.80 亿元,森林和草地生态系统价值也分别减少 6.08 和 0.61 亿元,荒漠生态系统价值无明显变化。2010~2015 年研究区内生态系统服务价值减少 45.61 亿元,水体生态系统价值变化占据主要地位,下降 23.33 亿元;此外,农田和森林生态系统价值也分别下降 10.31 和 12.52 亿元;草地和荒漠生态系统价值无明显变化,经济快速发展和人类活动频繁使得这一时期下降幅度最大。从不

同生态系统类型的生态服务价值贡献率的看,这 3 个研究时段各生态系统均保持相对稳定,其中森林生态系统贡献率最高,达到 42%左右,水体、农田、草地、荒漠生态系统贡献率依次减少。

根据上述公式计算得到各项生态系统服务功能价值(表 4),水资源供给功能 22%左右的贡献度在 9 个二级生态服务功能中最高,其次是净化环境功能,其贡献度约 21%,而贡献度最低为食物生产功能,占比仅约为 4%。1990~2015 年各项生态服务功能价值普遍呈相对减少趋势,其中食物生产、气体调节、气候调节、土壤保持与生物多样性等价值逐年下降,而食物生产功能价值下降幅度最大,下降约 9.11%;原材料生产、水资源供给、净化环境等价值为先增后减的变化趋势,但最后分别减少 1.78%、0.70%、2.51%,减少幅度较前者平缓;美学景观价值先增加后减少,变化保持不变。

表 4 单项生态系统服务功能价值及其变化(亿元)

Tab. 4 Value of individual ecosystem services and its changes

生态系统服务功能	年份							
	1990	2000	2010	2015	1990~2000	2000~2010	2010~2015	1990~2015
食物生产	110.69	107.23	102.18	100.60	-3.13	-4.71	-1.54	-9.11
原材料生产	142.87	143.19	141.96	140.32	0.23	-0.86	-1.16	-1.78
水资源供给	574.58	579.85	583.60	570.59	0.92	0.65	-2.23	-0.70
气体调节	234.53	233.53	229.98	227.29	-0.42	-1.52	-1.17	-3.09
气候调节	242.06	239.63	234.50	231.46	-1.00	-2.14	-1.30	-4.38
净化环境	550.75	551.09	549.26	536.93	0.06	-0.33	-2.24	-2.51
土壤保持	360.97	356.51	347.91	343.64	-1.24	-2.41	-1.23	-4.80
生物多样性	287.96	286.92	283.29	279.18	-0.36	-1.26	-1.45	-3.05
美学景观	139.86	141.57	142.81	139.86	1.22	0.87	-2.06	0.00

### 3.2.2 各城市等级生态价值分析

考虑到生态系统服务价值受人口、经济规模影响较大,不同城市的经济、人口、土地资源政策等因素导致城市群内部出现显著差异<sup>[31~33]</sup>。为了进一步研究城市群内部不同规模等级的差异,本文借助钟业喜等<sup>[34]</sup>对城市规模的计算方法,再采用世界银行的区域经济分类方法和标准,按城市规模平均值的 150%、100%和 50%依次划分为 4 种类型,分别为第 I、II、III、IV 等级。划分结果如下:第 I 等级的城市为上海市、南京市、杭州市和苏州市;第 II 等级的城市为合肥市、无锡市、南通市、盐城市和宁波市;第 III 等级的城市为常州市、镇江市、扬州市、

泰州市、台州市、绍兴市、金华市、嘉兴市和芜湖市;第 IV 等级的城市为安庆市、马鞍山市、宣城市、池州市、铜陵市、滁州市、湖州市和舟山市。

表 5 不同等级城市的生态系统服务价值

Tab. 5 Ecosystem services value in different cities

等级	年份			
	1990	2000	2010	2015
I	608.98	607.25	594.77	589.60
II	524.40	521.93	516.96	498.88
III	726.27	727.12	720.41	708.58
IV	784.61	783.23	783.35	772.82

将不同城市并入对应的等级分类中,并分别统计得到相应的生态系统服务价值总量(表 5),

各等级城市的生态系统服务价值总量由高到低依次为Ⅳ、Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ，且基本呈下降趋势。Ⅲ、Ⅳ等级城市相对高于Ⅰ、Ⅱ等级，经济和人类活动的影响是主要原因。从总体变化来看，下降速度与总量大小成反比，第Ⅱ等级的城市下降最快，减少 25.52 亿元，第Ⅳ等级的城市下降最慢，减少 11.78 亿元。各等级城市的单位面积生态系统服务价值差异较大，由高到低依次为Ⅰ、Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ，第Ⅰ等级城市境内含有太湖大部分水域面积，为第Ⅰ等级城市提供高额的生态价值；第Ⅲ和第Ⅳ等级的城市境内含有大面积的林地或长江水域，其生态系统服务价值也相对较高；第Ⅱ级的城市行政区划面积较大且经济较发达、人口较密集，生态用地不足，使得生态系统服务价值最低。

为了进一步研究生态与经济的关系，本文选用各等级城市的生态系统服务价值与该等级城市当年的地区生产总值的比值作为衡量一个地区生态价值与经济价值协调发展的指标。1990 年第Ⅳ等级的城市的价值比值最高，达到 2.86，远远高于其他等级的城市，Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ等级的城市

的价值比值分别为 1.06、0.86、0.47，依次减小表明城市规模越大，经济价值越占主导地位；随着时间的推移，各地区发展经济的作用下，地区生态价值远远跟不上经济价值的变化速度，最终导致价值比值持续走低。2015 年Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ等级的城市的价值比值分别为 0.01、0.02、0.06、0.03，在同样遵循规模等级的趋势下，各等级的城市的生态与经济发展严重失调。

### 3.3 生态系统服务价值空间分布分析

#### 3.3.1 空间分布格局分析

为了进一步研究长江三角洲城市群生态系统服务价值的空间分布特征，借助 ArcGIS 中栅格数据重采样工具，将 1900、2000、2010 和 2015 年四期的土地利用数据栅格单元转化为 10 km×10 km，并将其转成矢量点数据，共得到 2 029 个样本数据点，以每个样本数据点代替原每 1 万个栅格的值，即这些栅格的生态系统服务价值，再利用 ArcGIS 中的地统计分析工具，对所有样本数据点做普通克里金预测，最终得到长江三角洲城市群的生态系统服务价值空间分布格局(图 1)。

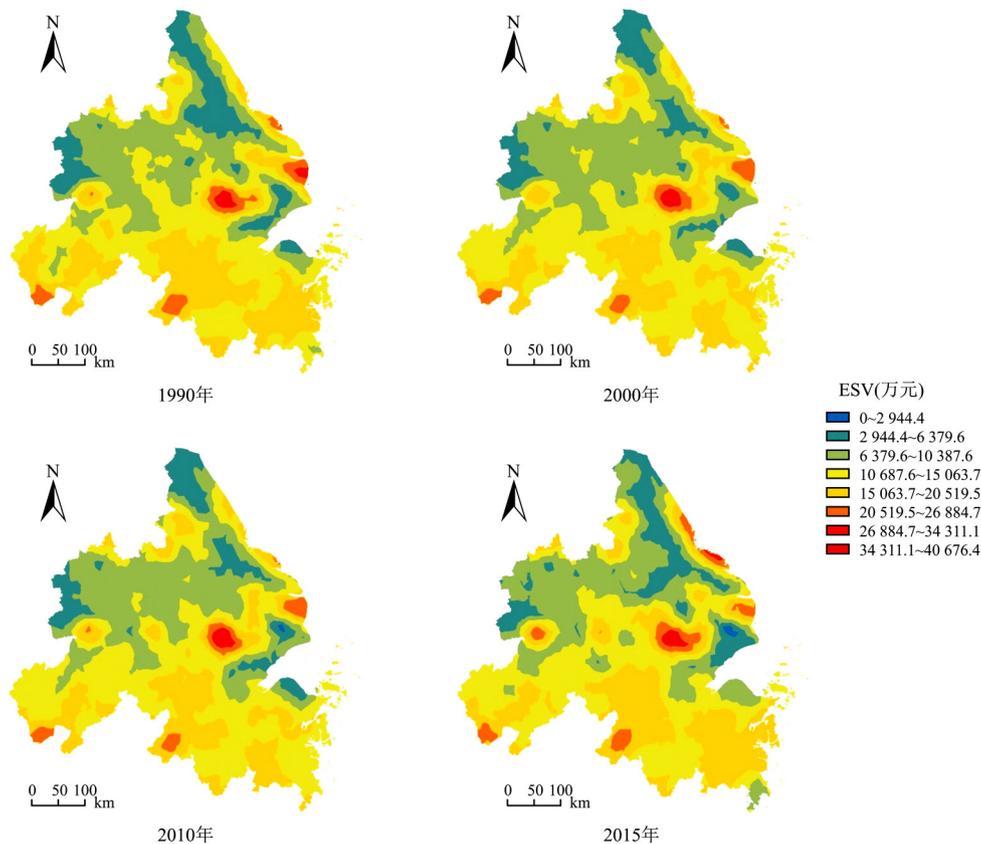


图 1 生态系统服务价值空间分布格局

Fig. 1 Spatial distribution pattern of ecosystem service value

1990~2015 年期间长江三角洲城市群生态系统服务价值总体分布呈现以太湖为中心的高值集聚区,东南地区高于西北地区的特征,出现明显的差异性。太湖和巢湖及周边地区形成高值集聚区主要原因是其蕴含丰富的水体资源,生态价值系数较高,故同等面积下的生态系统服务价值更高。长江三角洲城市群西北部多利于耕种的平原地形,所以农田分布较多,而南部多山地丘陵,森林覆盖度较高,由上述研究可知,森林生态价值系数高于耕地,因此形成东南高于西北的空间分布特征。除此之外,在杭州市北部、宣城市与湖州市交界地带和宁波市与金华市交界地带也出现较大范围的高值集聚区,与森林集聚分布密切相关。然而,在上海市、合肥市西部和盐城市北部小范围的出现明显低于其他地区的低值区,这些区域为社会经济发达、人地关系冲突明显,且土地利用类型的建设用地为主的地区,高价值的生态用地极度缺乏,导致其生态系统服务价值偏低。

### 3.3.2 空间分布影响因素分析

土地利用的变化是引起生态系统服务价值变化的主要原因之一,不同的生态系统类型含有不同的土地利用类型,当这种地类转化为另一种地类时,其范围内的生态系统服务价值也会发生相应变化。导致土地利用变化的因素主要为人类生产生活的需求,如人口增长、经济发展、城市扩张,人类不断地侵占耕地、林地等生态用地,使得生态空间进一步被压缩。另一方面,生态系统服务功能价值还受到生态系统的能量交换、水分循环、土壤侵蚀与堆积、生物地球化学循环等主要生态过程的影响<sup>[35,36]</sup>,以及地形<sup>[37-39]</sup>、人口<sup>[40]</sup>和土壤<sup>[41,42]</sup>等影响也较大。

本研究借助地理探测器对研究区生态系统服务价值空间分布影响因素进行探测,定量的计算各因子对其的影响强弱。地理探测器一般处理的自变量  $X$  为类型数据,需将连续数值做离散化转换,结合王劲峰等<sup>[30]</sup>提出的数据离散化方法,根据上述分析的影响因素,选取高程、坡度、人口、土壤类型和土壤侵蚀度 5 个影响因子,并分别将其分为 7 类。利用 ArcGIS 创建 3 km×3 km 的渔网面,共得到 22 545 个样本单元,在每一个样本单元中分别计算因变量生态系统服务价值量 and 对应的自变量类型数据,作为地理探测器方法计算的基本样本。

各因子探测结果表明,生态系统服务价值各影响因子差异显著(表 6),高程、坡度、人口、土壤类型、土壤侵蚀度等因子的平均  $q$  值分别为 0.771、0.807、0.577、0.597、0.006。坡度的大小对生态系统服务价值的分布影响最大。坡度大的地区不利于开垦和人类活动,故生态价值高的区域多分布于地势陡峭的山地丘陵地带,如安庆-池州-宣城-湖州-金华一带;同时高程因子对其空间分布影响也较为明显,高程低的平原地区,如嘉兴、泰州、常州、铜陵等地区,人类活动频繁,利于经济开发,生态用地被严重破坏。人口和土壤类型因子对生态系统服务价值的影响同样显著,人口分布密集地区不免占用生态用地为生存活动空间导致其偏低,土壤类型为铁铝土地区较利于植被生长使得该地区生态价值较高。土壤侵蚀度因子对生态系统服务价值为非显著影响,长江三角洲城市群土壤侵蚀基本为微度水力侵蚀,其空间分布几乎覆盖整个研究区域,与生态系统服务价值的空间分布无明显关联。

表 6 不同时期各因子作用强度  
(地理探测器  $q$  值)及其变化

Tab. 6 Intensity of each factor in different periods  
(geographic detector  $q$  value) and its changes

	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年
高程	0.866	0.776	0.762	0.679
坡度	0.848	0.838	0.809	0.732
人口	0.475	0.625	0.718	0.490
土壤类型	0.635	0.641	0.610	0.500
土壤侵蚀度	0.007	0.006	0.006	0.006

## 4 结论与讨论

采用 1990、2000、2010 和 2015 年 4 期长江三角洲城市群土地利用数据,再利用土地利用转移概率矩阵、谢高地等修正 Costanza 价值量评价法和地理探测器等方法,充分地分析了长江三角洲城市群的土地利用方式和转移方向,定量计算了区域内的生态系统服务价值,并对不同规模等级城市及其空间分布格局进行了深入分析。

通过以上研究,可以得出以下结论:

(1) 长江三角洲城市群土地利用类型以耕地为主,其次为林地、建设用地、水域和草地,未利用地最少。

(2) 耕地持续减少,林地变化相对稳定,草地变化先减后增,水域变化先增后减,建设用地

持续增长。

(3) 从土地利用转移方向看,建设用地的保留率最高,耕地为其主要转化来源,草地主要转化为耕地和林地,未利用地主要转为耕地和建设用地,林地主要来源为草地和的转化其次为水域的转化,水域主要转出为建设用地。

(4) 1990、2000、2010 和 2015 年长江三角洲城市群的生态系统服务价值分别为 2 644.26、2 639.53、2 615.49 和 2 569.88 亿元,总体呈逐渐下降趋势,共减少 74.38 亿元。农田生态系统价值下降最快,森林生态系统价值对整个区域的贡献率最大。Ⅲ、Ⅳ等级的城市的生态系统服务价值要高于Ⅰ、Ⅱ等级,并且城市规模越大,经济价值越占主导地位。生态系统服务价值的总体分布呈现以太湖为中心的高值集聚区,东南地区高于西北地区的特征。

(5) 地理探测器的探测表明生态系统服务价值各因子差异显著,高程、坡度、人口、土壤类型、土壤侵蚀度等因子的平均  $q$  值分别为 0.771、0.807、0.577、0.597、0.006,坡度因子对生态系统服务价值的影响最大,其次为高程、土壤类型、人口,而土壤侵蚀度与其无明显关联。

对长江三角洲城市群的土地利用及其生态系统服务价值的时间动态变化与空间分布格局进行了深入分析和定量计算,然而影响其变化的因素通常是多元的、复杂的,而本文考虑的因素较为单一,忽略了城市建设用地提供的生态系统服务价值,尚未将随着经济发展带来的通货膨胀影响以及区域内生态系统的生物量等因素纳入在内,在分析区域内生态与经济协调关系层面的现象描述和解释归因不尽完美。但此研究结果具有一定的代表性,可为长江三角洲城市群土地利用与生态文明建设提供优化建议,如完善相关法律法规、强化监管责任措施、加大生态环境保护力度、打造生态文明示范区,促进生态与经济协调发展。

## 参考文献:

- [1] MOONEY H A, DURAIAPPAH A, LARIGAUDERIE A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(1): 3665-3672.
- [2] 刘纪远,张增祥,庄大方,等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J]. 地理研究, 2003, 22

(1): 1-12.

- LIU J Y, ZHANG Z X, ZHUANG D F, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-Use and driving forces analyses of China in the 1990s [J]. Geographical Research, 2003, 22(1): 1-12.
- [3] MONTANARELLA L, PENNOCK D J, MCKENZIE N J, et al. World's soils are under threat [J]. Soil Discussions, 2015, 2(2): 79-82.
- [4] KAPLAN J O, KRUMHARDT K M, ZIMMERMANN N E. The effects of land use and climate change on the carbon cycle of Europe over the past 500 years [J]. Global Change Biology, 2012, 18(3): 902-914.
- [5] DAILY G C. Nature's Service: Societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [6] 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[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 225-233.
- YAO C S, ZHU H J, LV X, et al. Study on impact socio-economic driving factors the of Land use change on the ecosystem services value in Fujian Province [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 225-233.
- [7] 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.
- ZHAO J Z, XU Y J, XIAO H, et al. Ecosystem services evaluation based on comprehensive national power for sustainable development: The evaluations on 13 countries [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2003(1): 121-127.
- [8] COSTANZA R, D'ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural Capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [9] 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.
- [10] 赵同谦,欧阳志云,郑 华,等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报, 2004(4): 480-491.
- ZHAO T Q, OUYANG Z Y, ZHENG H, et al. Forest ecosystem services and their valuation in China [J]. Journal of Natural Resources, 2004(4): 480-491.
- [11] 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[J]. 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 [J]. Resources Science, 2016, 38(8): 1572-1584.
- [12] 王宗明,张 柏,张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究[J]. 自然资源学报, 2004(1): 55-61.
- WANG Z M, ZHANG B, ZHANG S Q. Study on the effect of

- land use change on ecosystem service values of Jilin Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004( 1): 55-61.
- [13] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. *生态学报*, 2017, 37( 8): 2497-2505. JIANG B, CHEN Y Y, XIAO Y, et al. Evaluation of the economic value of final ecosystem services from the Baiyangdian wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37( 8): 2497-2505.
- [14] 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. PENG W F, ZHOU J M, YANG C J, et al. Research on ecosystem service values based on land use change in Sichuan Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23( 7): 1053-1062.
- [15] 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.
- [16] AISHA O A, DENG X Z, OLUSANYA A O, et al. 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.
- [17] 密科娜, 庄汝龙, 梁龙武, 等. 长三角 PM<sub>2.5</sub> 时空格局演变与特征——基于 2013~2016 年实时监测数据[J]. *地理研究*, 2018, 37( 8): 1641-1654. MI K N, ZHUANG R L, LIANG L W. Spatio-temporal evolution and characteristics of PM<sub>2.5</sub> in the Yangtze River Delta based on real-time monitoring data during 2013-2016 [J]. *Geographical Research*, 2018, 37( 8): 1641-1654.
- [18] 沙桐, 马晓燕, 王健颖, 等. 长江三角洲冬季电厂排放对大气污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2018( 9): 3288-3297. SHA T, MA X Y, WANG J Y, et al. The impact of power plant emission on air pollution during winter over Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2018( 9): 3288-3297.
- [19] 李廉水, 王长源, 石喜爱. 长三角城市群雾霾排放效率分析与提升策略[J]. *管理现代化*, 2018( 5): 116-121. LI L S, WANG C Y, SHI X A. Analysis and Improvement Strategy of Haze Emission Efficiency in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. *Modernization of Management*, 2018( 5): 116-121.
- [20] 林兰. 长三角地区水污染现状评价及治理思路[J]. *环境保护*, 2016, 44( 17): 41-45. LIN L. Assessment and treatment of water pollution in Yangtze River Delta [J]. *Environmental Protection*, 2016, 44( 17): 41-45.
- [21] 刘晓红, 虞锡君. 长三角地区重金属污染特征及防治对策研究[J]. *生态经济*, 2010( 10): 164-166. LIU X H, YU X J. Study on characteristics and countermeasures of heavy metal pollution in Yangtze River Delta [J]. *Ecological Economy*, 2010( 10): 164-166.
- [22] 和庆, 彭自然, 张晨, 等. 长三角地区池塘养殖水产品重金属含量及其健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36( 6): 1070-1077. HE Q, PENG Z R, ZHANG C, et al. Heavy metals content of pond aquaculture products in Yangtze River Delta and the health risk associated with human consumption [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36( 6): 1070-1077.
- [23] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. 关于印发长江三角洲城市群发展规划的通知 [EB/OL]. [2016-01]. [http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201606/t20160603\\_806390.html](http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201606/t20160603_806390.html).
- [24] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. *遥感学报*, 1997, 1( 3): 225-230. LIU J Y. Study on national resources & environment survey and dynamic monitoring using remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1( 3): 225-230.
- [25] 徐岗, 赵羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. *应用生态学报*, 1993, 4( 3): 272-277. XU L, ZHAO Y. Forecast of land use pattern change in Dongling District of Shenyang: An application of Markov process [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4( 3): 272-277.
- [26] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. *地理学报*, 2003, 58( 5): 643-650. ZHU H Y, LI X B. Discussion on the index method of regional land use change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58( 5): 643-650.
- [27] 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.
- [28] 吴松, 安裕伦, 马良瑞. 城市化背景下喀斯特流域生态服务价值时空分异特征——以贵阳市南明河流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24( 9): 1591-1598. WU S, AN Y L, MA L R. Study on spatio-temporal variation in the value of ecosystem services for karst watershed under the background of urbanization [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24( 9): 1591-1598.
- [29] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24( 1): 107-127.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72( 1): 116-134. WANG J F, XU D C. Geodetector: Principle and prospective

- [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] 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.  
ZHAO X F. Comparison on evaluation result and index system of ecosystem service values based on land use [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 98-105.
- [32] 李 锋, 叶亚平, 宋博文, 等. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5623-5631.  
LI F, YE Y P, SONG B W, et al. Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: a case study in Changzhou City, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [33] 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): 333-340.  
HU C X, GUO X D, LIAN G, et al. Effects of land use change on ecosystem service value in rapid urbanization areas in yangtze river delta: A case study of Jiaxing City [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 333-340.
- [34] 钟业喜, 陆玉麒. 基于铁路网络的中国城市等级体系与分布格局[J]. 地理研究, 2011, 30(5): 785-794.  
ZHONG Y X, LU Y Q. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on railway network [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 785-794.
- [35] FU B J, WANG S, SU C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [36] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.  
FU B J. *Ecosystem service and ecological security* [M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2013.
- [37] 武爱彬, 庞 磊. 高原地区生态用地分布变化与地形因子的关系研究——以河北坝上为例[J]. 江西农业学报, 2018, 30(8): 101-105.  
WU A B, PANG L. Study on relationship between terrain factors and spatial distribution of ecological land in Plateau Area: Taking Bashang Plateau of Hebei Province as an example [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(8): 101-105.
- [38] 哈 凯, 丁庆龙, 门明新, 等. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系——以河北省怀来县为例[J]. 地理研究, 2015, 34(5): 909-921.  
HA K, DING Q L, MEN M X, et al. Spatial distribution of land use and its relationship with terrain factors in hilly area [J]. *Geographical Research*, 2015, 34(5): 909-921.
- [39] 朱昌丽, 张继飞, 赵宇鸾, 等. 青藏高原东缘典型流域生态系统服务的地形梯度效应——以岷江上游为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1687-1699.  
ZHU C L, ZHANG J F, ZHAO Y L, et al. Topographic gradient effects of typical watershed ecosystem services in the eastern tibetan plateau: A case study of the upper reaches of Minjiang river [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(10): 1687-1699.
- [40] 王建强, 彭文英, 李若凡. 京津冀人口土地生态压力及空间调控战略研究[J]. 人口与经济, 2018(5): 83-90.  
WANG J Q, PENG W Y, LI R F. Land ecological pressure of population and spatial regulation strategy in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Population & Economics*, 2018(5): 83-90.
- [41] 袁大鹏, 石 垚, 赵雪杉, 等. 基于土壤类型区的冀西北间山盆地生态服务价值研究——以怀来县为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 307-314.  
YUAN D P, SHI Y, ZHAO X B, et al. Study on the ecological service value of the mountainous basin in the northwest of Hebei Province based on the soil type region: A case study of Huailai County [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 307-314.
- [42] 谢 刚, 董艳艳, 谢元贵, 等. 重点开发区景观格局变化与土壤侵蚀研究——以贵州省龙里县为例[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 280-286.  
XIE G, DONG Y Y, XIE Y G, et al. Analysis of landscape pattern change and soil erosion in key development zones: Taking Longli County of Guizhou Province as an example [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(18): 280-286.

## Spatio-Temporal Evolution of Land Use and Ecosystem Service Value in Yangtze River Delta Urban Agglomeration

ZHU Zhi-zhou , ZHONG Ye-xi

( School of Geography and Environment Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research , Ministry of Education , Jiangxi Normal University , Nanchang 330022 , China)

**Abstract:** Based on the land utilization data of the Yangtze River Delta urban agglomerations in 1990 , 2000 , 2010 and 2015 , the land utilization distribution pattern and the transfer direction of the Yangtze River Delta urban agglomeration have been described using the transition probability matrix of land utilization methods , Then , the value of ecosystem services within the region quantitatively was analyzed by the Xie Gao-di modified Costanza value evaluation methods , and its spatial distribution pattern was explained by geodetector. The research showed that the main land utilization type of urban agglomeration in the Yangtze River Delta was cultivated land , showing a trend of decreasing year by year. The change of woodland was relatively stable , the change of water area was increased in the early time and then decreased , the construction land has been growing , and the retention rate of construction land was the top one , which cultivated land was the main source of conversion , grassland was mainly converted into cultivated land and forest land , and the water were mainly transferred to construction land. The ecosystem services value in the 1990 , 2000 , 2010 and 2015 of Yangtze River Delta urban agglomerations was 266. 426 billion yuan , 263. 953 billion yuan , 261. 549 billion yuan and 256. 988 billion yuan , showing a trend of decreasing year by year. The value of farmland ecosystem decline was most obvious , and the contribution of forest ecosystem makes the greatest contribution to the entire region The value of the ecosystem services of cities with grades III and IV is higher than that of I and II , and the larger the scale of the city , the more obvious dominant position of the economic value. The spatial distribution pattern was characterized by high-value clusters centered on Taihu Lake and Chaohu Lake , and higher in the southeast region than in the northwest region , which influenced by slope , elevation , soil type and population.

**Key words:** land utilization change; ecosystem service value; spatial distribution; Yangtze River Delta urban agglomeration