

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¹

刘桂林^{1' 2' 3}, 张落成^{1' *}, 张倩⁴

【摘要】：基于1980—2010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，分析了长三角30年来生态系统服务价值的时空动态及其对土地利用变化的响应。结果表明，1980—2010年，长三角建设用地面积变化最大，为446.1%，未利用地、耕地、草原、林地、水域的变化分别为285.9%、-31.5%、-76.2%、-5.4%、42.9%；1980—2010年，长三角地区的总生态系统服务价值减少了4.40%，水源涵养、休闲娱乐、废物处理生态系统服务功能价值上升；生态系统服务价值极低区域的面积增加且分布于城市扩张区域，生态系统服务价值中等区域逐年下降且被生态系统服务价值低区域所替代，高生态系统服务价值区域处于增加的趋势而极高区域基本维持不变；常州、湖州、嘉兴、南京、泰州的生态系统服务价值逐年增加，而其他城市的则处于下降趋势。

【关键词】：土地利用；生态系统服务价值；时空动态；长三角

生态系统服务功能是指生态系统与过程所形成并维持的人类赖以生存的自然环境条件与功能^[1-3]。生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)评估，现已成为生态经济学和环境经济学的研究重点^[4-5]，是建立绿色国民经济核算体系的基础工作^[6]，并且有助于人类福利及经济可持续发展^[7]。生态系统服务价值评价将以非市场评价法的生物多样性和物种保护的评估为主导方向^[8]，单个生态系统的服务价值将逐步受到重视^[9]。如何耦合市场法与非市场法，建立完善的评估方法也将是今后的重点。然而，基于生态经济学、环境经济学理论的货币化定量估算方法仍能较为直接地反应生态系统服务功能价值^[5, 10]。Constanza最先基于17类生态系统服务功能，估算了全球生态系统服务价值^[11]，该方法已经视为今后生态系统服务价值研究的基础。

土地利用/覆盖变化是人类活动对环境影响最直接的表现，土地利用现状图也是人地关系的一面镜子^[12]。土地利用/覆盖变化通过改变地表覆盖类型，从而影响生态系统的结构、过程、功能^[13-16]。因此，基于土地利用/覆盖变化的生态系统服务价值估算是最直接的方法，且能从地表生态过程及效应、土地利用变化过程等方面来揭示生态系统服务价值的生态学意义。诸多学者也在不同空间尺度上，就土地利用变化对生态系统服务价值的影响进行了相关的研究^[17-20]。对于快速城市化区域，生态系统服务价值对土地利用剧烈变化及地表生态过程响应的相关报道较少。

改革开放以来，随着经济的快速发展、人口增加、快速城市化和工业化，长江三角洲地区(简称长三角，下文均用此称)的环境问题日益严重，如太湖蓝藻、无锡饮水安全，高质量耕地流失、空气和土壤重金属污染^[21]。长三角建设用地急剧增加，耕地非农转化加速，那么快速城市化背景下的长三角生态系统服务价值时空动态如何呢？因此，本文揭示了长三角1980—2010年的土地利用时空动态对生态系统服务价值及其区域差异的影响。

1 研究区概况

基金项目：国家自然科学基金(41130750)；中国科学院南京地理与湖泊研究所135项目(NIGLAS2012135006)

收稿日期：2013-06-12；**修订日期**：2013-11-14

*** 通讯作者**：Corresponding author. E-mail: lchzhang@niglas.ac.cn

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室，南京210008；
2. 中国科学院大学，北京100049；
3. 特里尔大学环境遥感与地理信息系，德国特里尔D-54286；
4. 南京林业大学风景园林学院，南京210037

本文中的长三角地区包括上海市、江苏省（泰州市、扬州市、南通市、南京市、镇江市、常州市、无锡市、苏州市）、浙江省（湖州市、嘉兴市、杭州市、绍兴市、宁波市、舟山市、台州市）两省一市共16个城市。长三角地区的年平均太阳总辐射量约 4.6×10^5 — $5.0 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$ ；年日照时数2000—2200 h；年平均气温14—17℃；年均降水为1000—1500mm^[22]。长三角区位优势优越，是我国近代资本和民族工商业兴起最早的地区之一，至今仍是我国经济发展最快的区域，沿着长江、杭州湾分布着两个城市化程度较高的城市带^[23]。

2 数据源及研究方法

2.1 数据源

1980、2005年的土地利用数据来自于中国地球科学系统数据分享中心。从美国地质调查局网站上，下载2009—2010年覆盖研究区的Landsat5 TM影像，采用人机交互解译法获取2010年的土地利用数据，其总体精度为87.5%、Kappa系数为0.82。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值计算

为了估算中国区域的生态系统服务价值，谢高地修正了Costanza提出的方法，并根据200多位中国生态学家的调查问卷，获取了生态系统服务价值的当量系数^[24]。生态系统服务价值当量因子是生态系统潜在服务价值的相对贡献率，该因子等于每年每公顷粮食价值的1/7。利用该方法订正生态系统服务当量可将该方法推广到不同的研究区，并使结果更符合实际。1980—2010年，长三角地区的平均粮食产量为6089.72 kg/hm²，且2010年的平均粮食价格为1.998元/kg，所以长三角地区一个生态系统服务价值当量因子为1738.18元/hm²，进而获得生态系统服务价值系数（表1）。长三角地区的生态系统服务价值的计算公式：

$$\begin{aligned}ESV &= \sum (A_k \times VC_k) \\ESV_f &= \sum (A_k \times VC_{fk})\end{aligned}\quad (1)$$

式中，ESV为生态系统服务价值； A_k 是土地利用类型 k 的面积； VC_k 是生态系统价值系数； ESV_f 是生态系统第 f 项服务功能价值； VC_{fk} 是土地利用类型 k 的第 f 项服务功能价值系数。

表1 长三角地区土地利用类型的生态系统服务价值系数

Table 1 Ecosystems service value coefficients of land use categories in Yangtze River Delta

生态系统服务与功能 Ecosystem service and functions	林地 Woodland	草地 Grassland	耕地 Farmland	湿地 Wetland	水域 Water body	未利用地 Unused land
气体交换 Gas regulation / (元/hm ²)	6083.63	1390.544	869.09	3128.724	0	0
气候调节 Climate regulation / (元/hm ²)	4693.086	1564.362	1546.98	29722.88	799.5628	0
水源涵养 Water conservation / (元/hm ²)	5562.176	1390.544	1042.908	26941.79	35458.87	52.1454
土壤形成与保护 Soil formation and protection / (元/hm ²)	6778.902	3389.451	2537.743	2972.288	17.3818	34.7636
废物处理 Waste treatment / (元/hm ²)	2277.016	2277.016	2850.615	31600.11	31634.88	17.3818
生物多样性保护 Biodiversity conservation / (元/hm ²)	5666.467	1894.616	1234.108	4345.45	4328.068	590.9812
食物生产 Food production / (元/hm ²)	173.818	521.454	1738.18	521.454	173.818	17.3818
原材料 Raw material / (元/hm ²)	4519.268	86.909	173.818	121.6726	17.3818	0
娱乐休闲 Entertainment culture / (元/hm ²)	2224.87	69.5272	17.3818	9646.899	7543.701	17.3818
合计 Total / (元/hm ²)	37979.23	12584.42	12010.82	109001.3	79973.66	730.0356

2. 2. 2 区域差异性分析

生态系统服务价值的相对变化率是指生态系统服务价值变化与土地利用面积变化之间的比率 [25]，其被用于反映区域差异，公式如下：

$$R = \frac{R_L}{R_C} = \frac{(L_b - L_a) / L_a}{(C_b - C_a) / C_a} \quad (2)$$

式中，R 是相对变化率；RL，RC分别是区域、总体变化率；La，Lb分别是局部初始与末期ESV；Ca，Cb分别是全局初始与末期ESV。相对变化率有如下几个特征：

（1）相对变化率的绝对值 $|R| \geq 1$ ，暗示了区域生态系统服务价值的变化幅度要高于整个研究区。若 $R \geq 1$ ，则表明区域与全局生态系统服务价值变化趋势与方向是相反的；而 $R \leq -1$ ，则说明区域与全局生态系统服务价值变化趋势与方向是一致的。

（2）相对变化率的绝对值 $|R| < 1$ ，说明区域生态系统服务价值的变化幅度要小于整个研究区。若 $-1 < R < 0$ ，表明区域与全局生态系统服务价值变化趋势与方向是相反的；而 $0 < R < 1$ 则说明区域与全局生态系统服务价值变化趋势与方向是一致的。

2. 2. 3 敏感性分析

本文利用敏感性指数 (Coefficient of Sensitivity, CS) [26]，来确定生态系统服务价值随着时间变化对生态系统价值系数变化的依赖程度。如果 $CS > 1$ ，说明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，则其准确度差、可信度较低；如果 $CS < 1$ ，则说明ESV对VC是缺乏弹性的，结果是可信的。敏感性指数计算公式如下：

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_k - VC_a) / VC_a} \right| \quad (3)$$

式中，VC、k的含义同前，ESVi和ESVj代表初始值和生态价值系数调整后的价值。

3 结果分析

3. 1 土地利用时空动态变化分析

基于遥感解译数据，分析了长三角地区的土地利用时空动态（图1）。长三角土地利用变化的总体趋势为：建设用地、水域、未利用地面积的增加，其余类型面积的减小趋势（表2）。其中，建设用地变化幅度最大，1980—2010年间变化率为446.1%；其次为未利用地，其变化率为285.9%；耕地、草地、林地、水域的变化率分别是-31.5%、-76.2%、-5.4%、42.9%。尽管未利用地的变化率较大，但其面积的变化较小。1980—2005年，林地、草地面积增加而在2005—2010年则大幅度减小。湿地、耕地面积则一直处于下降趋势，而建设用地与未利用地则一直增加。

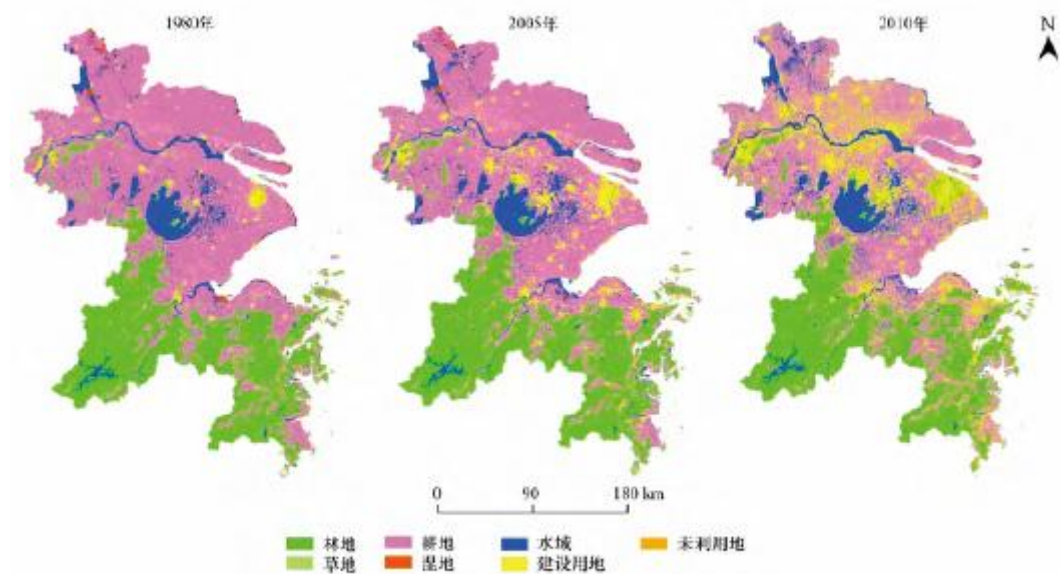


图 1 1980—2010 年长三角地区土地利用分类图
Fig. 1 Land use classification map in Yangtze River Delta, 1980—2010

表 2 1980—2010 年长三角土地利用变化
Table 2 Land use changes in Yangtze River Delta, 1980—2010

年份 Year	土地利用类型 Land use types	林地 Woodland	草地 Grassland	湿地 Wetland	水域 Water body	耕地 Farmland	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
1980	面积 Area / ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	31670	925.5	1245	8723	63180	4051	15.77
2005	面积 Area / ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	31810	988.8	876.6	9564	57260	9408	17.28
2010	面积 Area / ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	29920	220.9	253.9	12460	43280	22120	60.84
1980—2005	面积变化 Area change / ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	140	63.3	-368.4	841	-5920	5357	1.51
	变化率 Change rate / %	0.5	6.75	-29.5	9.75	-9.25	132.25	9.5
2005—2010	面积变化 Area change / ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	-1890	-767.9	-622.7	2896	-13980	12712	43.56
	变化率 Change rate / %	-5.95	-77.65	-71.05	30.3	-24.4	135.1	252.1
1980—2010	面积变化 Area change / ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	-1750	-704.6	-991.1	3737	-19900	18069	45.07
	变化率 Change rate / %	-5.4	-76.2	-79.5	42.9	-31.5	446.1	285.9

3. 2 长三角生态系统服务价值的时空变化

3. 2. 1 长三角地区生态系统服务总价值变化

30a 来长三角的生态系统服务总价值呈负增长, 从 1980 年的 420.99 亿元减小到 2010 年的 402.47 亿元, 减小了 4.40% (表 3)。1980—2005 年, 长三角生态系统服务价值下降了约 1.35%; 2005—2010 年, 长三角地区的生态系统服务价值从 2005 年的 415.31 亿元下降到 2010 年的 402.47 亿元, 减小了约 3.09%。1980—2005 年, 林地生态系统服务价值增加了 0.44%; 而在 2005—2010 年却减小了 5.94%, 呈倒 V 形变化。草地的生态系统服务价值与林地具有相似的变化趋势。1980—2005 年, 草地的生态系统服务价值增加了 6.84%, 而在 2005—2010 年则下降了 77.66%。1980—2010 年, 耕地与湿地生态系统服务价值一直处于衰减趋势, 其中: 1980—2005 年, 耕地与湿地的生态系统服务价值分别减小了 9.37%、29.59%; 2005—2010 年, 耕地与湿地则分别减小了 24.41%、71.04%。1980—2010 年, 水域、未利用地的生态系统服务价值则一直处

于上升趋势。1980—2005 年，水域、未利用地的生态系统服务价值分别增加了 9.64%、9.58%；2005—2010 年，水域、未利用地则分别增加了 30.28%、252.08%。

表3 长三角地区 1980—2010 年各类用地生态系统服务及总价值变化
Table 3 Changes of ecosystem service value of Yangtze River Delta, 1980—2010

土地利用类型 Land use types	1980	2005	2010	1980—2005		2005—2010		1980—2010	
	生态服 务价值 ESV/ ($\times 10^8$ 元)	生态服 务价值 ESV/ ($\times 10^8$ 元)	生态服 务价值 ESV/ ($\times 10^8$ 元)	生态服 务价值 ESV/ ($\times 10^8$ 元)	变化率/% Change rate	生态服 务价值 ESV/ ($\times 10^8$ 元)	变化率/% Change rate	生态服 务价值 ESV/ ($\times 10^8$ 元)	变化率/% Change rate
林地 Wood land	180.42	181.22	170.45	0.80	0.44	-10.77	-5.94	-9.97	-5.53
草地 Grassland	1.747	1.867	0.417	0.12	6.84	-1.45	-77.66	-1.33	-76.13
耕地 Farmland	113.827	103.161	77.974	-10.67	-9.37	-25.19	-24.41	-35.85	-31.50
湿地 Wetland	20.356	14.333	4.151	-6.02	-29.59	-10.18	-71.04	-16.21	-79.61
水域 Water body	104.642	114.730	149.471	10.09	9.64	34.74	30.28	44.83	42.84
未利用地 Unused land	0.002	0.002	0.007	0.00	9.58	0.01	252.08	0.005	285.80
建设用地 Construction land	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总计 Total	420.99	415.31	402.47	-5.68	-1.35	-12.84	-3.09	-18.52	-4.40

ESV: Ecosystem Service Value

3. 2. 2 单项生态系统服务总价值变化

就单项生态系统服务价值而言，1980—2010 年水源涵养、休闲娱乐、废物处理生态服务功能价值处于增加趋势，其生态系统服务价值变化率分别为11.15%、2.15%、3.69%（表4）。其他单项生态系统服务功能处于下降趋势，其中气体调节、食物生产、气候调节、土壤形成与保护的生态服务价值变化较大，其变化率分别是一4.80%、一5.27%、一9.99%和一10.14%，变化幅度均高于4.5%。生物多样性保护、原材料的生态系统服务变化缓慢，其在1980—2010 年间的变化率分别是一3.59%、一1.72%。1980—2005 年，食物生产的生态系统服务价值下降了1.54%；而在2005—2010 年间下降了3.73%。食物生产的生态系统服务价值变化主要是与长三角耕地面积流失有关。

表4 1980—2010 年长三角生态系统服务价值结构变化
Table 4 Changes of structure of ecosystem service value of Yangtze River Delta, 1980—2010

生态系统服务功能 Ecosystem Service Function	单项生态系统服务功能 Single Ecosystem Service Function, ESV_f			生态系统服务价值变化变化% Ecosystem Service Value Change		
	1980	2005	2010	1980—2005	2005—2010	1980—2010
气体交换 Gas regulation	37.91	37.11	33.11	-0.8	-4	-4.8
气候调节 Climate regulation	43.77	40.97	33.78	-2.8	-7.18	-9.99
水源涵养 Water conservation	87.93	90.12	99.08	2.19	8.96	11.15
土壤形成与保护 Soil formation and protection	57.3	55.06	47.16	-2.24	-7.9	-10.14
废物处理 Waste treatment	85.44	85.22	89.13	-0.22	3.91	3.69
生物多样性保护 Biodiversity conservation	45.35	44.7	41.77	-0.65	-2.93	-3.59
食物生产 Food production	17.7	16.15	12.43	-1.54	-3.73	-5.27
原材料 Raw material	23.17	23.11	21.45	-0.06	-1.66	-1.72
娱乐休闲 Entertainment culture	22.42	22.87	24.57	0.45	1.7	2.15
合计 Total	420.99	415.31	402.47	-5.68	-12.84	-18.52

从生态系统服务价值构成上分析，水源涵养、废物处理、土壤形成与保护、生物多样性保护是长三角地最主要的生态系统服务功能。1980—2010 年，该生态系统服务功能都占据各时期内所有功能的 10%以上，并且四者的总和也超过了生态系统服务功能的 50%。长三角是典型的江南水乡，水网、水库湖泊密布且水量充沛，因此水源涵养生态功能最高，超过了 20%。

3. 2. 3 生态系统服务价值的空间分布

在 ArcGIS9.3 软件中，基于 5 km×5 km 网格来分别表达 1980、2005、2010 年长三角地区的生态系统服务价值的空间差异，5km 格网完全能够表达与土地利用类型的相关性且运算量较低（图 2）。并将生态系统服务价值各级别进行了重命名：极低

(小于 1 万元/hm²)、低(1—3 万元/hm²)、中(3—5 万元/hm²)、高(5—7 万元/hm²)、极高(大于 7 万元/hm²)。1980—2010 年,生态系统服务价值极低区域,主要分布于各城市建成区域内,以上海市最为显著。极低区域随着城市化的加剧呈现急剧扩大趋势,并沿长江、环杭州湾方向扩展。1980—2010 年,低生态系统服务价值区域的分布形态与耕地的空间分布吻合。从时空分布上分析,浙江南部地区的低生态服务价值区域逐年扩大而长三角北部则逐年减小。生态系统服务价值中区域的分布与林地的空间布局相吻合,并且主要位于浙江省境内。生态系统服务价值中区域的分布区域大幅度减小,特别在浙江南部区域,其逐步被低生态系统服务价值区域所替代。生态系统服务价值高、极高区域的形状与水域分布相一致,并且生态系统服务价值与水域面积成正比,即生态系统服务价值极高的区域主要为水面较大的区域。1980—2010 年,高生态系统服务价值区域处于增加的趋势,极高区域基本维持不变。

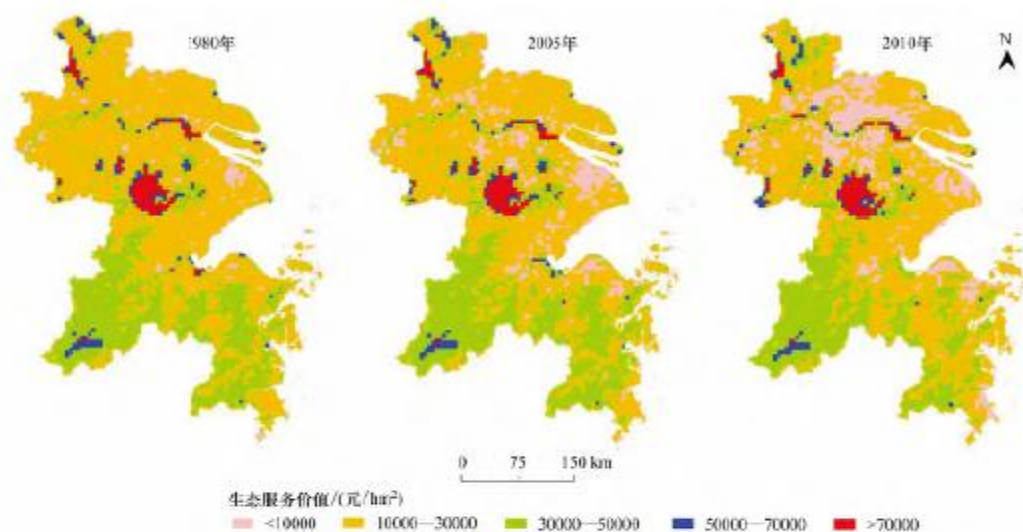


图 2 1980—2010 年长三角生态系统服务价值空间分布

Fig. 2 Distribution of the ecosystem services value in Yangtze River Delta, 1980—2010

<http://www.ecologica.cn>

3. 2. 4 区域生态系统服务价值的差异分析

1980—2010 年,杭州市生态系统服务价值的比例最大的;其次是苏州、台州;舟山市的生态系统服务价值最小(表5)。1980—2010 年,常州、湖州、嘉兴、南京、泰州的生态系统服务价值分别增加了2.54%、6.06%、6.14%、11.87%、7.96%;其余城市则逐步减小,宁波市下降幅度最大(为16.09%);其次是南通、上海、绍兴及台州。

1980—2005 年,常州市、南京市生态系统服务价值的变化率分别为-1.68%、-1.87%,说明两市的变化幅度高于整个区域且与长三角变化趋势相反。南通、宁波、上海、无锡的生态系统服务价值比长三角下降地更剧烈。泰州、台州、舟山市的生态系统服务价值变化幅度低于长三角且变化趋势相反。2005—2010 年,常州、湖州、嘉兴、南京、泰州的生态系统服务价值变化趋势与研究区相反;除常州外,其余城市的生态系统服务价值变化幅度均较大。从整体变化趋势上分析,常州、南京、泰州的生态系统服务价值一直处于下降趋势。1980—2005 年,湖州、嘉兴的生态系统服务价值均处于下降趋势;而 2005—2010 年,则处于增加趋势,呈现“V”型变化趋势。

表5 1980—2010 年长三角各城市生态系统服务价值差异性
Table 5 Variations of ecosystem service value change in each city of Yangtze River Delta, 1980—2010

区域 Region	差异性 Variation			变化率 Change rate/%		
	1980—2005	2005—2010	1980—2010	1980—2005	2005—2010	1980—2010
常州	-1.68	-0.14	-0.68	2.18	0.35	2.54
杭州	0.85	0.10	0.36	-1.10	-0.24	-1.33
湖州	0.00	-2.53	-1.62	0.00	6.07	6.06
嘉兴	3.73	-4.81	-1.64	-4.85	11.56	6.14
南京	-1.87	-3.84	-3.18	2.43	9.22	11.87
南通	1.10	4.67	3.34	-1.43	-11.21	-12.48
宁波	2.63	5.46	4.31	-3.42	-13.12	-16.09
上海	10.49	-2.12	2.48	-13.64	5.10	-9.24
绍兴	0.58	3.30	2.31	-0.76	-7.91	-8.61
苏州	0.78	0.72	0.73	-1.01	-1.72	-2.71
台州	-0.51	3.79	2.27	0.66	-9.08	-8.48
泰州	-0.59	-2.98	-2.13	0.77	7.14	7.96
无锡	2.92	0.80	1.51	-3.80	-1.92	-5.65
扬州	0.09	1.04	0.70	-0.12	-2.50	-2.62
镇江	0.27	1.00	0.73	-0.35	-2.40	-2.74
舟山	-0.49	2.25	1.29	0.64	-5.41	-4.81

3. 3 敏感性分析

将土地利用类型的生态价值系数分别调动50%来分析生态系统服务价值的变化及对价值系数的敏感程度。1980、2005 及2010 年的敏感指数均小于1，分别为0.107、0.109、0.106，其中未利用地的敏感性指数最小而林地最大，表明生态系统服务价值对价值系数缺乏弹性，研究结果可信。

3. 4 土地利用变化对生态系统服务价值的影响

作为著名的“粮仓”，长三角早已拥有优越的农业生产要素，且稳定的自然条件对土地利用影响甚微。长三角地区经济发展迅速，快速城市化、工业化及人口增长，对生态系统影响的最直接体现便是土地利用变化。根据统计年鉴数据，快速城市化导致了长三角建设用地急剧增加、耕地面积锐减。产业结构调整，特别是水产养殖面积逐年增加，造成了部分耕地的减少与水域面积的增加。长三角区域土地利用变化直接影响了各生态类型的生态系统服务价值。

1980—2005 年，长三角生态系统服务价值下降的主要原因是耕地及湿地面积的下降；而2005—2010 年，则是由草地（77.66%）、湿地（71.04%）、耕地（24.41%）、林地（5.94%）所引起的生态系统服务价值缩减。由于经济快速发展，致使城市扩张加剧而林地、草地和耕地面积减少，进而导致生态系统服务价值下降。就单项生态系统服务功能而言，长三角的水源涵养生态系统服务功能趋于好转，主要因为1980—2010 年，水域面积增加并且人工沟渠密度增加，其将各生态系统类型相链接，增加了斑块间的信息流、物质流与能量流的转移，最终致使水源涵养生态系统服务功能趋于好转，其生态系统服务价值趋于增加趋势。

3. 5 长三角生态过程对生态系统服务功能的影响

本文，从土地利用景观格局变化及地表生态过程来阐述单项生态系统服务功能时空动态的驱动因素。尽管长三角耕地面积锐减，但设施农业逐步兴起，大量的农业投入，特别是化肥与农药的使用，造成了农业面源污染；长三角工业的快速发展，特别是乡镇企业的蓬勃发展，排放大量的工业废水；此外人口增加带来大量的生活污水，这些都导致了长三角水环境的污染。因此，水源涵养则成为该区域主要的生态系统服务功能。生活、工业废物，土壤重金属都使得废物处理、土壤形成与保护成为长

三角主要的生态系统服务功能。

基于“源-汇”的生态过程理论^[27]，长三角地区，建设用地、耕地等人为景观成为源景观，林地、草地、湿地、水域等自然景观则是汇景观，便可详细地表达景观类型间的生态过程，从而阐述生态过程对生态系统服务价值功能的影响。特别是长三角的建设用地面积急剧扩张，及城镇中的人口、工业增加，导致了源景观类型增加，逐步打乱趋于平衡的生态过程，致使生态系统服务价值逐步减弱。

4 结论

(1) 本文基于遥感数据获取的土地利用数据，估算长三角地区1980—2010年的生态系统服务价值，并从生态过程、景观格局等方面阐述其机理，该方法简单易行、普适性强。

(2) 1980—2010年，由于人口增长、快速工业化及城市化，导致建设用地增加了446.1%，林地、草地、耕地面积则减少。由此致使长三角生态系统服务价值减少了4.40%。农业面源污染、生活及工业污水造成了水环境的污染，影响了单项生态系统服务功能。水源涵养、废物处理、土壤形成和保持、生物多样性保护成为主要的生态系统服务功能。

(3) 生态系统服务价值极低区域处于上升趋势并集中于城市扩展区，生态系统服务价值中值区域低值区域所替代。1980—2010年，仅有常州、湖州、嘉兴、南京、泰州的生态系统服务价值增加，分别增加了2.54%、6.06%、6.14%、11.87%和7.96%。致谢：感谢北京大学环境科学与工程学院李天宏老师对本文写作的帮助；感谢中国科学院地球系统科学数据共享网提供的1980和2005年土地利用数据。

[References]:

[1] Daily G C. Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.

[2] James B, Spencer B. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics, 2007, 63(2 /3) : 616-626.

[3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.

[4] Chen Z X, Zhang X S. Value of ecosystem services in China. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(10) : 870-876.

[5] Pearce D. Auditing the Earth: The value of the world's ecosystem services and natural capital. Environment, 1998, 40(2) : 23-28.

[6] Study of Critical Environmental Problems (SCEP) . Man's Impact on the Global Environment Assessment and Recommendations for Action. Cambridge: MIT Press, 1970.

[7] Millennium Ecosystem Assessment (MA) . Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. Beijing: China Environment Science Press, 2005: 60-69.

-
- [8] Kumar P. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations. Earthscan: London and Washington, 2010.
- [9] Zhao J, Yang K. Valuation of ecosystem services characteristics, issues and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (1) :346-356.
- [10] Li J C, Jiang W L, Jin L S, Ren Y. Theory of Ecological Value. Chongqing: Chongqing University Press, 1999.
- [11] Costanza R, D'Arge R, Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neil R, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15) : 253-260.
- [12] Tuan Y F. Geography, phenomenology and the study of human nature. *The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien*, 1971, 15(3) : 181-192.
- [13] Priess J A, Minler M, Klein A M. Linking deforestation scenarios to pollination services and economic return in coffee agroforestry systems. *Ecological Applications*, 2007, 17: 407-417.
- [14] Ricketts T H, Regetz J, Steffan-Dewenter I, Cunningham S A, Kremen C, Bogdanski A, Gemmill-Herren B, Greenleaf S S, Klein A M, Mayfield M M, Morandin L A, Ochieng' A, Potts S G, Viana B F. Landscape effects on crop pollination services: Are there general patterns? *Ecology Letters*, 2008, 11(5) : 499-515.
- [15] Zhao L, Liu J P, Tian X Z. The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10) :3169-3176.
- [16] Zhao B, Kreuter B U, Li B, Ma Z J, Chen J K, Nakagoshi N. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China. *Land Use Policy*, 2004, 21 (2) :139-148.
- [17] Yue S P, Zhang S W, Yan Y C. Impacts of land use change on ecosystem services value in the Northeast China Transect (NECT) . *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(8) : 879-886.
- [18] Du Z Q, Shen Y D, Wang J, Cheng W S. Land-use change and its ecological responses: A pilot study of typical agro-pastoral region in the Heihe River, northwest China. *Environmental Geology*, 2009, 58(7) : 1549-1556.
- [19] Li T H, Li W K, Qian Z H. Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen. *Ecological Economics*, 2010, 69(7) : 1427-1435.
- [20] Li J C, Wang W L, Hu G Y, Wei Z H. Impacts of land use and cover changes on ecosystem service value in Zoige Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12) : 3451-3459.
- [21] Xu X B, Chen S, Yang G S. Spatial and temporal change in ecological assets in the Yangtze River Delta of China 1995—2007. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24) : 7667-7675.

[22] She Z X, Luo Y M, Ma Y J, Yang G S, Chen Z L, Gao X J, Huang W Y, Peng P Z, Pan G X. The Resources and Environment of Water-Land and Sustainability of the Yangtze River Delta. Beijing: Science Press, 2007.

[23] Sang Y F, Wang Z G, Li Z L, Liu C M, Liu X J. Investigation into the daily precipitation variability in the Yangtze River Delta, China. Hydrology Process, 2013, 27(2) : 175-185.

[24] Xie G D, Lu C X, Leng Y F, Zheng D, Li S C. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2) : 189-195.

[25] Feng Y X, Luo G P, Lu L, Zhou D C, Han Q F, Wu W Q, Yin C Y, Zhu L, Dai L, Li Y Z, Li C F. Effects of land use change on landscape pattern of the Manas River watershed in Xinjiang, China. Environment Earth Science, 2011, 64 (8) : 2067 - 2077.

[26] Kreuter U P, Hrris H G, Malock M D, Lacey R E. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. Ecological Economics, 2001, 39(3) : 333-346.

[27] Chen L D, Fu B J, Xu J Y, Gong J. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological processes. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11) : 2406-2413.

[参考文献]:

[9] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展. 生态学报, 2007, 27(1) : 346-356.

[10] 李金昌, 姜文来, 靳乐山, 任勇. 生态价值论. 重庆: 重庆大学出版社, 1999.

[15] 赵亮, 刘吉平, 田学智. 近60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2013, 33(10) : 3169-3176.

[17] 岳书平, 张书文, 闫业超. 东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响. 地理学报, 2007, 62(8) : 879-886.

[20] 李晋昌, 王文丽, 胡光印, 魏振海. 若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2011, 31(12) : 3451-3459.

[21] 徐昔保, 陈爽, 杨桂山. 长三角地区1995-2007 年生态资产时空变化. 生态学报, 2012, 32(24) : 7667-7675.

[22] 余志祥, 骆永明, 马毅杰, 杨桂山, 陈振楼, 高效江, 黄文钰, 彭补拙, 潘根兴. 长江三角洲水土资源环境与可持续发展性. 北京: 科学出版社, 2007.

[24] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2) : 189-195.

[27] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 巩杰. 基于源汇生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11) : 2406-2413.