

1991 年以来长三角快速城市化地区生态经济系统协调度评价及其空间演化模式¹

王振波, 方创琳, 王婧

【摘要】：以长江三角洲经济区1991、2001、2008 年的Landsat TM影像解译数据为基础, 以长三角90 个县(市、市区) 为基本研究单元, 构建空间数据转换模型、ESV模型、EEH模型, 借助ArcGIS 9.3 平台对海量的栅格和矢量数据进行空间分析, 依据ESV指数和EEH指数揭示长三角经济发展与生态环境系统的相关关系和演变特征, 并进行功能分区和模式提炼。研究表明: ① 1991 年以来长三角地区土地利用类型大幅转换, 城镇面积增长最大, 来源主要是水田、旱地、草地、园地和其他用地; ② ESV模型研究发现, 1991-2001 时段长三角生态系统呈现恶化趋势, 2001-2008 时段恶化幅度有所减缓, 同时证明水域、水田变为城镇和旱地的开发行为对生态系统的稳定性具有极大的伤害; ③ 1991 年来GDP空间格局为中、南部高北部低, 其中1991-2001 时段中部增长率明显高于北部, 2001-2008 时段中部增长率明显高于南北; ④依据EEH指数将长三角分为12 类区域, EEH空间特征为生态冲突区居中心区位, 生态协调区居边缘区位, 并且按EEH由低到高呈现出明显的核心—边缘空间结构; 1991-2001 时段长三角生态—经济关系已经出现了集中型初步恶化趋势, 2001-2008 时段则由集中型初步恶化趋势向分散型恶化与协调并存状态; ⑤ 通过空间数据转换模型将长三角分为5 种生态经济演变类型分区: 初始恶化区、初始协调区、持续恶化区、协调降低区、协调升级区; ⑥ 总结出长三角EEH的空间演变模式: 梯度模式与核心边缘模式共存, 其中一级梯度模式为北中南三大横向梯度带, 二级梯度模式为长三角南北两翼的东中西三大纵向梯度带; 核心边缘模式概括为7 大组团: 即苏锡常沪组团、南京组团、绍兴组团、苏北组团、泰州组团、杭州组团、南通组团。不同的模式对应着不同的生态经济系统演变方式, 反映出长三角快速城市化地区内部存在着较大程度的生态经济关系空间分化趋势。

【关键词】：长三角地区; LUCC; 生态系统服务价值; 生态经济系统协调度; 空间演化模式

1 引言

工业化和城市化被看作中国经济社会发展水平的重要标志。中国的工业化史无前例, 将推动7.2 亿以上的农民走进城市; 中国城市化被称为21 世纪最伟大的革命, 对全球可持续发展具有特别重要的意义。然而快速工业化植根于能源巨大需求与消耗, 快速城市化不断地占用水田、草地等生态资源, 对生态系统进行超负荷挖掘和使用势必损伤生态系统服务功能(Ecosystem Service Function, ESF)。所以追求经济发展与保障生态安全是一对矛盾, 二者协调度影响着区域发展的健康与可持续性。在全球低碳化背景下^[1], 生态经济系统协调度是衡量区域发展健康与否的重要标准, 对其进行评价是当前学术界和各国政府共同关注的热点和焦点之一。

ESF 是土地利用合理发展的重要参考, 土地利用变化应兼顾考虑对 ESF 的影响^[2-3]。ESF 研究开始于 1997 年^[2,4-8], 之后不

1. 收稿日期: 2011-03-10; 修订日期: 2011-06-22

基金项目：国家自然科学基金项目(40971101) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 40971101]

作者简介：王振波(1980-), 男, 山东禹城人, 博士, 助理研究员, 中国地理学会会员(S110007159A), 主要从事城市规划与城乡统筹研究。E-mail: zhenbowang@126.com

通讯作者：方创琳(1966-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110001715M), 主要从事城市发展与城市规划等研究。E-mail: fangcl@igsnr.ac.cn
(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

断引入空间技术手段探讨其与 LUC 之间的相关关系,包括时空变化规律^[9]、评价尺度^[10]、市场与非市场价值^[3]、多样性^[11-12]、可持续性评估^[13]、土地使用功能^[14]等;生态系统服务功能与区域经济发展水平和开发程度密切相关,当前衡量生态经济系统协调发展的相关方法包括能值分析^[15-16]、生态足迹分析、物质流分析、指标体系评价等,研究区域主要为森林、流域、干旱区等单类型区和单个城市^[17-21],这些方法在应对区域空间的生态与社会经济要素的外部性及价值的精确度方面仍存在较多限制。随着 LUC 及空间技术的不断发展^[22-23],生态经济系统协调发展研究有了科学性突破,LUC 时空过程宏观生态效应评价也为其提供了有力的方法支撑^[24-27]。综合来看,运用 RS、GIS 技术与方法对生态与经济系统矛盾冲突最为激烈的快速城市化地区进行生态经济系统的协调度(EEH)评价与空间等级划分的研究较少。长三角都市连绵区^[28]是中国城市化与工业化的前沿地区,它的发展历程对整个中国和世界发展中国家的区域发展实践具有重大的引导作用。所以研究长三角地区 EEH 问题,对于总结历史经验,调整国家和地区的区域发展模式与战略具有重要的借鉴意义^[29]。

2 研究区域与数据来源和处理

2.1 研究区域与数据来源

本文研究区域为长江三角洲的核心区,面积为 $11.57 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括上海市,江苏省苏州、无锡、常州、南京、镇江、扬州、南通、淮安(市区)、盐城(除响水县),浙江省杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴。研究单元为县域行政单元,考虑到研究单元的精确性和科学性,上海市面积较小的徐汇区、长宁区、静安区、普陀区、闸北区、虹口区、杨浦区全并为一个单元,其他市区面积较大,保持独立单元;各地级市市区均合并为一个研究单元,共包括 90 个研究单元(图 1)。土地利用数据来源于 Landsat TM 影像,空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,获取时间集中在 1991 年 10 月、2001 年 11 月和 2008 年 10 月。因长三角地区作为亚热带季风气候的北缘,10 月、11 月时间范围内植被和农作物的变化不明显,具有可比性。研究单元的社会经济数据来源于同年份各省、地级市、市区的统计年鉴及城市规划资料。



图1 研究区范围与区位
Fig. 1 Location and range of the study areas

2.2 遥感数据处理

对遥感影像进行相对辐射校正、几何纠正、面积提取等预处理。以研究区2001 年的地形图为准,采用三次多项式对3 个时相的遥感影像进行几何纠正,经重新选点检验,配准误差在一个象元之内。再以2001 年遥感影像为标准,采用SCR (Scatter-gramControlled Regression) 方法,以一次线性回归的形式对1991 年和2008 年的遥感影像进行简易标准化处理。依据《全国土地分类》(过渡期间适用)及研究区实际情况,将土地利用类型分为草地、林地、园地、滩涂、其他、旱地、城镇、水田、水域等9 类。参考同期的地面要素现状数据,随机选取若干样本区域,计算分类误差矩阵和kappa 系数,对最后得到的土地利用结果图进行精度检验,3 个时相的综合分类精度依次达到78.33%、83.50%和85.68%,各类用地kappa 系数也都超出最低允许判别精度70%的要求。虽然分类精度仍可能会对有关指标的计算造成相应的不确定性影响,但这并不影响各指标对土地利用时空分异特征的表达^[30]。

2.3 土地利用数据处理

借助ArcGIS 9.3 对长江三角洲地区1991、2001、2008 年影像解译的栅格数据和矢量数据进行空间分析,得出30 m×30 m 精度的土地利用结构演变数据:① 分别统计3 个时期各类用地面积;② 采用空间分析方法提取动态变化图斑,获取土地利用变化信息,统计分析各类用地变化的数量特征;③ 对3 期数据进行叠加分析,构建转换矩阵,得出3 个时期各类用地相互转化的空间分布特征;④ 以超过50%单个栅格面积为标准,将土地利用类型栅格数据与县域行政区边界数据叠加,得出每个研究单元3 个时期土地利用类型的变化情况。

3 结果分析

3.1 LUCC特征

1991-2008 年,研究区土地类型结构发生了显著变化。空间上看,9 大类用地中城镇面积增长最大,17 年间增长了 1.65×10^4 km²;主要来源于水田、旱地、草地、园地和其它用地,其中水田面积减少 0.71×10^4 km²,旱地减少 0.53×10^4 km²。时间上看,2001-2008 时段(下称0108 时段)土地类型结构变化大于1991-2001 时段(下称9101 时段)。城镇用地面积比重在9101 时段减少1.53%,而0108 时段增长15.79%;同样,水田与旱地面积比重在9101时段分别减少2.24%和0.01%,而0108 时段分别减少3.89%和4.57%。除此之外,林地比重从1991 年的18.72%增长到2001 年的22.83%,又回落到2008 年的17.27%;滩涂在17 年间面积比重增长了0.29%,水域面积则减小了1.61% (表1)。

3.1.1 LUCC 时间演变特征9101 时段城镇和林地面积显著增加,水田和旱地显著减少。城镇增长的土地来源主要是水田、旱地、水域和林地,分别占转入面积的75%、14%、7%、3%;林地增长的土地来源主要是旱地、水田和水域,分别占到60%、32%、5%。水田主要转化为旱地、城镇、水域和林地,占转化面积分别为45%、29%、12%、12%;旱地主要转化为水田、林地、城镇,占转化面积分别为53%、35%、8%。此外,草地主要转化为水田、林地和水域;园地主要转化为旱地、林地和水田;滩涂主要转化为水域和水田;城镇主要转化为水田和旱地;水域主要转化为水田、旱地和城镇。

0108 时段城镇面积快速增加,滩涂面积小幅增长,水域保持平衡,其余用地面积减少。增长的用地类型中,城镇用地的来源主要是水田、林地、旱地和水域,分别占转入面积的61%、16%、15%、8%;滩涂主要源于水田和水域。减少的用地类型中,旱地减少幅度最大,分别转换为水田46%、林地24%、城镇23%、水域6%;其次为水田,转换为城镇58%、旱地21%、林地11%、水域10%。此外,草地主要转变为水田和城镇;林地转化为城镇、旱地、水田和水域;园地转化为水田、城镇、林地和旱地,滩涂主要转化为水田、水域、城镇和旱地;其他用地主要转化为水田、城镇、林地和旱地;城镇主要转化为水田、林地、旱地和水域;水域主要转化为水田、城镇和林地。

表1 1991、2001、2008年长三角地区各类用地数量及比重

年份		草地	林地	园地	滩涂	其他	旱地	城镇	水田	水域
1991	km ²	392.91	21670.76	241.70	403.21	251.64	16745.93	11168.49	55644.79	9216.26
	%	0.34	18.72	0.21	0.35	0.22	14.47	9.65	48.08	7.96
2001	km ²	192.87	26417.17	169.37	350.63	39.37	16739.39	9401.90	53048.70	9376.31
	%	0.17	22.83	0.15	0.30	0.03	14.46	8.12	45.84	8.10
2008	km ²	42.03	19989.83	33.51	738.04	12.24	11442.9	27667.62	48462.91	7346.63
	%	0.04	17.17	0.03	0.64	0.01	9.89	23.91	41.37	6.35

3.1.2 LUCC 空间演变特征按行政边界对统计单元的土地利用类型进行分类统计, 得出 1991 年到 2008 年各统计单元草地、林地、园地、滩涂、其他、旱地、城镇、水田及水域等用地类型的演变特征(图 2, 表 2)。

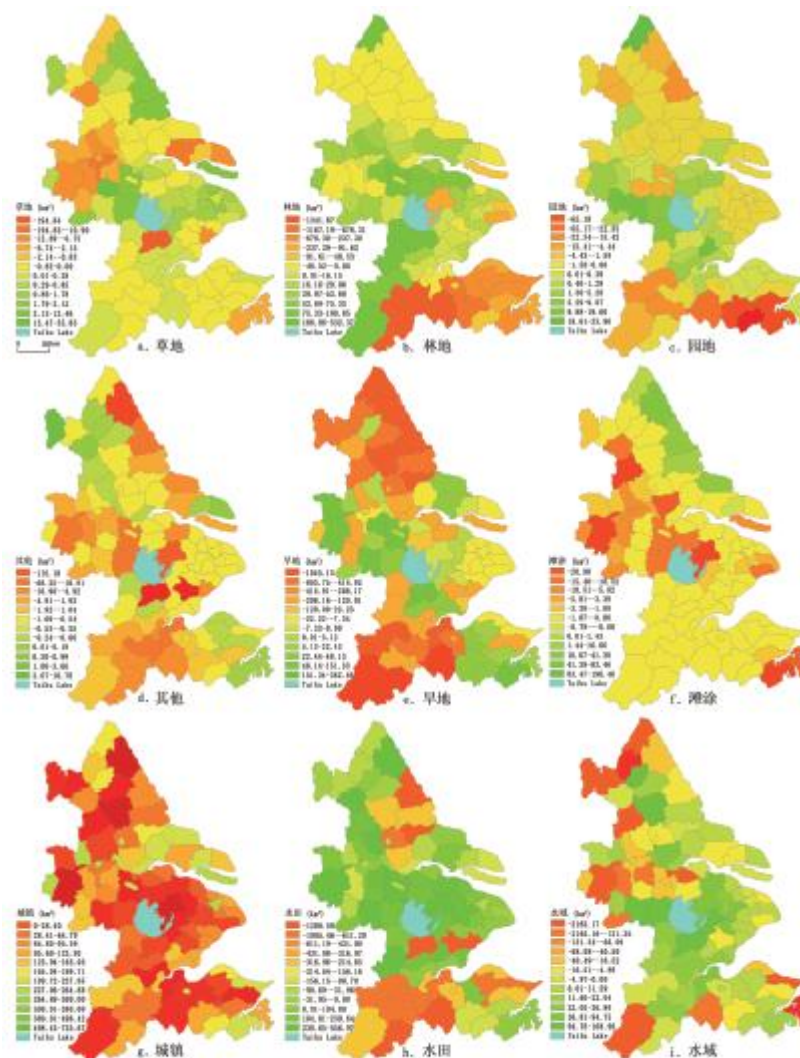


图2 1991-2008年长三角地区各类用地转换的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of land conversion in Yangtze River Delta from 1991 to 2008

3.2 生态系统服务功能的演变特征

借助 1997 年 Robert Costanza 等 13 位生态学家和经济学家在《自然》杂志上发表的关于生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV) 估算的经典研究标准及方法^[4-5], 结合长江三角洲地区的现状, 运用间接价值评估方法, 综合考虑研究区生态系统服务的气体管理、气候管理等 17 种主要类型, 得出每个年份各类用地数据的价值系数, 进行 ESV 估算。园地与水田在 Costanza 标准中没有明确提到, 根据向悟生相关研究, 园地取森林和草地的平均值即 2316.01 元·hm⁻²·yr⁻¹ 较接近现实^[31]; 长三角地区湖泊众多, 水田作为湖泊湿地广泛分布, 故其单位面积 ESV 参考标准中的湖藻湿地计算^[32-33]。从 ESV 空间格局变化的切入点出发, 应以一个不变价格作为基准来考察 ESV 的变化, 为了与 Robert Costanza 1997 年的研究成果相对接, 本文以 1994 年的价格水平及平均汇率为替代基准对三个年份的 ESV 数据进行可比性计算。

表 2 长三角地区 1991-2008 年各类用地演变特征及空间布局
Tab. 2 Land evolution and spatial distribution in Yangtze River Delta from 1991 to 2008

类型	演变特征
草地	存在于全区的 49 个单元, 目前基本消失, 面积减少 392.91 km ² 。湖州市缩减面积最大, 为 194.76 km ² ; 宁镇扬常及南通市区和射阳县为草地缩减集中地 (图 2a)。
林地	总面积减少 1680.93 km ² 。其中 37 个单元面积减少, 高度缩减区位于杭州东部、绍兴和宁波市, 桐庐县、建德县、诸暨市和富阳县缩减面积最大, 其次是苏州市区、金坛县、南汇区、奉贤区、松江区、射阳县缩减 10 km ² 以上; 54 个单元面积增加, 安吉县增加最多, 其次为湖州市、杭州市西部、太湖沿岸及苏锡常交界地区 (图 2b)。
园地	存在于 74 个研究单元, 目前基本消失, 面积减少 241.70 km ² 。宁波、绍兴和杭州市南部地区园地缩减最为显著, 其中新昌县缩减最多, 约为 65 km ² 。苏州市区、武进、如皋、大丰也有明显缩减 (图 2c)。
滩涂	总面积增加 334.83 km ² 。面积增加单元集中于江苏沿海的大丰、射阳、如东、东台和和滨海, 其中射阳增长最多, 约 250 km ² ; 面积缩减显著的单元集中于三大地区: 太湖沿岸的苏锡常地区, 南京、扬州向北延伸到高邮湖沿岸地区, 宁波的宁海县和象山县。南京市滩涂面积减少最多, 约为 16 km ² (图 2d)。
其它	存在于 68 个单元, 目前基本消失, 面积减少 251.64 km ² 。缩减单元集中在三个片区: 宁波、绍兴和杭州的南部, 江苏沿海, 苏州、南京、镇江和常州的部分县市。嘉兴市缩减最多, 超过 100 km ² (图 2e)。
旱地	面积减少 5303.03 km ² 。面积缩减的 42 个单元位于杭州和绍兴片区、苏中和苏北、上海周边。面积增长的 33 个单元位于中部片区, 含南京、湖州、及常州、扬州南部、苏州和南通市; 浙江沿海, 包括宁波和绍兴市东部地区 (图 2f)。
城镇	总面积增加 16499.13 km ² , 除淳安、临安、湖州、嘉兴、平湖、宜兴、崇明、六合、淮安等因行政区合并等原因城镇面积减少外, 其他均有增长, 形成 4 个集聚区: 苏锡常沪集聚区, 苏州市为集聚中心; 宁镇扬集聚区, 南京市为中心; 苏中集聚区, 以盐城为中心, 南与宁镇扬集聚区相连, 东到沿海各县市; 杭州、宁波、绍兴、湖州集聚区 (图 2g)。
水田	总面积减少 7094.12 km ² 。50 个单元面积减少, 主要位于苏锡常、宁镇扬六市, 其中武进、溧阳、江都和宝应减小面积最大; 40 个单元面积增长, 集中在 4 个片区: 江苏沿海及中部, 包括盐城、南通、泰州和淮安; 宁镇扬交界县市; 湖州、嘉兴及平湖; 杭州、绍兴和宁波大部。其中嘉兴、大丰和淮安 3 地水田面积增长显著 (图 2h)。
水域	总面积减少 1869.63 km ² , 太湖水域减少 2000 km ² 以上。面积减少的 49 个单元集中于 3 大片区: 沪宁杭三角区, 北至常熟, 东至上海, 西至溧水, 南至桐庐, 以太湖沿岸最为显著; 盐城大纵湖地区和南通沿海地区; 宁波和绍兴边界地区, 以宁海为重; 面积增加的 41 个单元集中于 3 大片区: 宁镇扬和常州交界区, 以高邮、阜宁增加面积最大; 盐城北部及沿海地区和淮安; 以淳安和象山为高值区的杭州南部, 及绍兴和宁波地区 (图 2i)。

3.2.1 生态系统服务功能的时间演变根据表 3 得出 1991、2001、2008 年长三角地区 ESV 值: 5606.13 亿元、5565.25 亿元、4836.31 亿元(表 4), 17 年间降低了 769.82 亿元, 表明其生态系统趋于恶化; 其中 9101 时段年均降低 0.45%, 0108 时段年均降低 0.14%, 表明该时段生态系统受损程度正在减缓。从类型来看, 滩涂 ESV 出现增长, 这与江苏省沿海淤泥质海岸淤积使陆地面积增长相吻合; 其他土地类型的 ESV 均在降低, 其中水田占到了总降低量的 81.91%, 水域占到了 18.19%, 表明将水域、水田变为城镇和旱地对生态系统的稳定性具有极大的伤害。

表 3 长三角地区单位面积生态系统服务价值系数 (元·ha⁻²·yr⁻¹)
Tab. 3 Economy service value per unit area of Yangtze River Delta (yuan·ha⁻²·yr⁻¹)

用地类型	草地	林地	园地	滩涂	其他	旱地	城镇	水田	水域
价值系数	2012.41	2619.61	2316.01	35147.82	-	798.03	-	86655.18	73713.28

表 4 1991, 2001, 2008 年长三角地区生态系统服务价值 (亿元)
Tab. 4 ESV of Yangtze River Delta respectively in 1991, 2001 and 2008 (10⁸ yuan)

年份	草地	林地	园地	滩涂	其他	旱地	城镇	水田	水域	总价值
1991 年	0.79	56.96	0.56	14.22	-	13.41	-	4838.49	681.70	5606.13
2001 年	0.39	68.96	0.39	12.28	-	13.31	-	4581.14	688.78	5365.25
2008 年	0.00	52.37	0.08	25.94	-	12.15	-	4207.17	541.54	4836.31

3.2.2 生态系统服务价值的空间演变将各研究单元的 ESV 按等距离百分位法自然分类(NaturalBreaks (Jenks)) 为高、较高、中、较低、低生态服务价值区。1991 年低、较低与中值区呈片状分布于长三角南部的浙沪地区；而较高与高值区(江苏沿海地区)集中在江苏，只有常州、镇江与泰州市区为低生态服务价值区，其周边部分县市为中和较低值区。2001 年低与较低值区明显向北扩散，其范围涵盖了除嘉兴(中值区)外的浙沪地区，并将江苏沿江的张家港、靖江、仪征、六合、浦口，以及宿迁包括在内；中值区主要集中在苏锡常与扬州—镇江两片区域；高值区主要集中于江苏沿海地区，较高值区则分布于高值区以西地区。2008 年低值区范围明显减少，只包括浙江东部、上海中心区与苏南部分市区，浙江西部的杭州与绍兴下辖县市由低值区向较低值区的变化最为显著；中值区范围明显扩大，已经涵盖了除南京中心区、六合和句容以外的整个长江以南地区；同时，高和较高值区范围随之向苏中与苏北地区缩小。整体来看，9101 时段 ESV 降低的区域主要集中在浙江板块西部与东南部地区、上海北部与苏锡常环太湖地区、江苏西北部边缘带状区域；ESV 升高的区域主要集中在江苏长江以北的东部地区、上海南部与嘉兴地区、绍兴及宁波北部地区(图 3a)。0108 时段 ESV 降低的区域范围显著减小，集中在环太湖的苏锡常、上海西部与嘉兴地区，以及宁镇扬和盐城的部分市县；浙江板块和苏中苏北 ESV 明显上升(图 3b)。1991 年以来环太湖地区包括上海、苏锡常、嘉兴、湖州，以及宁镇扬和盐城射阳、建湖地区、绍兴东部与宁波南部地区是 ESV 明显下降的区域，浙江西南部 and 江苏沿海地区 ESV 则明显上升(图 3c)。

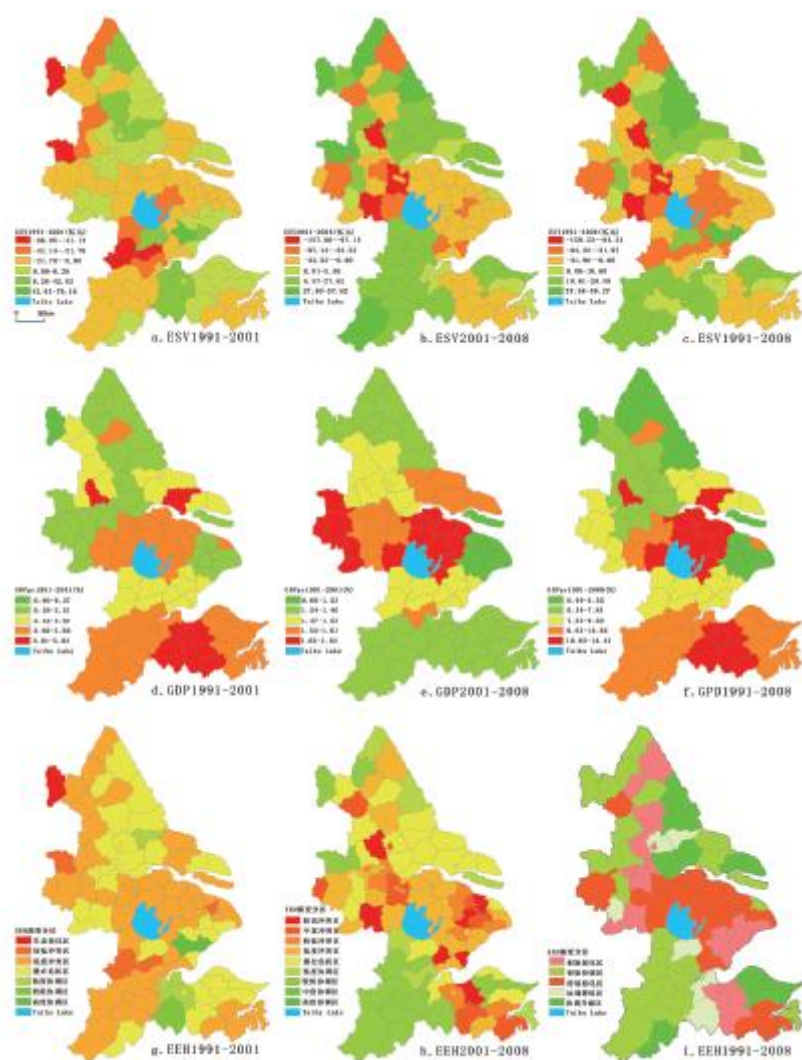


图 3 1991, 2001, 2008 年长三角地区生态系统服务价值、GDP、EEH 的变化情况
Fig. 3 ESV, GDP and EEH changes of Yangtze River Delta ecosystem respectively in 1991, 2001 and 2008

3.3 长三角经济发展特征

1991 年以来研究区GDP 快速发展。1991 年全区GDP 为2842.74 亿元， 2001 年10926.22 亿元，10 年增长了2.84 倍，经济高值区主要集中在沪苏锡杭等城市的市区；2008年全区GDP达27272.42 亿元，比2001 和1991 年分别增长了1.50 倍和8.59 倍，整个上海、环太湖沿岸、杭州湾南岸地区快速崛起，尤其是常州、扬州、镇江，以及宁波、泰州、淮安等市区也进入GDP高值区。依据1991 年不变价对研究单元GDP进行可比性处理，计算其地均GDP 的年增长率，并按Natural Breaks (Jenks) 方法将长三角地区分为高、较高、中、较低、低5 类区域，9101 时段南部与中部增长率明显高于北部地区，高值区包括绍兴市域、南通与扬州市区，较高区包括上海市中心区、宁波市、杭州市以及苏锡常和盐城市区，中值区包括湖州市、嘉兴市、南通与扬州所辖市县，其余除宿迁外均为较低增长区(图3d)；0108 时段中部增长率明显高于南北，高值区从长三角外围转移到苏南地区，主要包括苏锡宁地区，较高值区为常州、镇江与南通市，中值区包括湖州市、嘉兴市、泰州与扬州市，较低值区为除低值区上海以外的其他区域(图3e)。1991 年以来呈现中、南部高而北部低的格局，增长率高值区主要包括苏州、无锡、南通与扬州市区、绍兴市，较高区为上海市中心区、杭州、宁波和常州市，中值区为湖州、嘉兴、南京市与南通所辖县市，较低区为泰州市与扬州辖区，低值区为上海市(图3f)。

4 长三角EEH演变特征

EEH 指研究期内单位面积生态系统服务价值的变化率(ES_{pr}) 与单位面积 GDP 变化率(GDP_{pr}) 之比，可表示为：

$$EEH = \frac{ES_{pr}}{GDP_{pr}} ; \text{ 其中: } GDP_{pr} = \frac{GDP_{pj} - GDP_{pi}}{GDP_{pi}} ; ES_{pr} = \frac{ES_{pj} - ES_{pi}}{ES_{pi}} \quad (1)$$

式中： ES_{pi} 、 ES_{pj} 分别为研究区某时期始、末年份的单位面积生态系统服务价值($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)， GDP_{pi} 、 GDP_{pj} 为研究区某时期始、末年份的单位面积GDP ($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)。其中GDP依据研究单元1991年不变价进行计算；ESV数据以1994年价格水平为替代基准。

公式(1) 存在4 种可能情况：① $(2) > 0$ 且 $(3) > 0$ ，则 $(1) > 0$ ，生态经济系统处于协调状态；② $(2) > 0$ 且 $(3) < 0$ ，则 $(1) < 0$ ，生态经济系统处于非协调状态；③ $(2) < 0$ 且 $(3) > 0$ ，则 $(1) < 0$ ，生态经济系统处于非协调状态；④ $(2) < 0$ 且 $(3) < 0$ ，则 $(1) > 0$ ，生态经济系统处于最不协调状态，故必须将情况①与④明确区分。根据本文数据，长三角地区所有研究单元1991-2001-2008 年GDP均处于快速增长状态，此案例 $(2) < 0$ 的情况不存在。所以，可按以下标准进行EEH判断：

① $EEH \geq 1$ 表示研究区该时段 ESV 的增长速度不低于 GDP 增长，生态经济处于协调状态。此状态或者是该区域历史延续的原生的生态经济协调发展，或者是受制于生态环境对经济发展的约束，对前期受损害的生态系统进行较好修复的结果；② $0 \leq EEH < 1$ 表示研究区 ESV 的增长速度落后于经济增长，但经济发展正在承受越来越大的生态环境压力，生态环境尚无恶化，生态经济尚处于协调轨道；③ $-1 \leq EEH < 0$ 表示研究区 ESV 负增长，GDP 发展已经对生态环境产生危害，生态经济关系进入不协调轨道。根据 9101 和 0108 年两个时段长三角各研究单元 EEH 值演变特征，以 0.2 为 EEH 单位进行单元分类： $EEH < -1$ 为关系恶化区(A)， $-1 < EEH < -0.8$ 为高度冲突区(B)， $-0.8 < EEH < -0.6$ 为较高冲突区(C)， $-0.6 < EEH < -0.4$ 为中度冲突区(D)， $-0.4 < EEH < -0.2$ 为较低冲突区(E)， $-0.2 < EEH < 0$ 为低度冲突区(F)， $0 < EEH < 0.2$ 为潜在危机区(G)， $0.2 < EEH < 0.4$ 为低度协调区(H)， $0.4 < EEH < 0.6$ 为较低协调区(I)， $0.6 < EEH < 0.8$ 为中度协调区(J)， $0.8 < EEH < 1$ 为较高协调区(K)， $EEH > 1$ 为低度协调区(L)。

4.1 长三角地区EEH演变时序特征

整个长三角生态经济协调度空间表征为生态冲突区居中心区位，生态协调区居边缘区位，并且按生态经济协调程度由低到

高呈现明显的核心—边缘空间结构。

9101 时段，长三角生态—经济关系已经出现了集中型初步恶化趋势，但并没有达到剧烈恶化的程度。该时段长三角共有 AEF GHIL7 种 EEH 类型存在，BCDJK 类缺失(表 5)。在 90 个研究单元中，79 个处于低度冲突区和潜在危机区，在 50 个冲突状态单元中，低度冲突区占到 90%，主要集中在上海北部、苏锡常、杭州与湖州，以及江苏板块的西部边缘地区，表明该时段长三角生态—经济关系矛盾已经开始加剧；40 个协调状态单元中，潜在危机区占到了 85%，主要分布在上海南部、江苏板块的东北部和宁波北部地区，表明大部分协调单元面临着较大的生态—经济冲突挑战(图 3g)。

表 5 1991–2001，2001–2008 时段长三角地区 EEH 转换类别及单元数量

Tab. 5 EEH classification and quantity in Yangtze River Delta (1991–2001 and 2001–2008)													
状态		冲突状态							协调状态				
类别		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1991-2001 单元数		1	0	0	0	4	45	34	3	1	0	0	2
2001-2008 单元数		0	0	8	9	10	21	21	6	5	4	0	6

0108 时段，长三角地区生态—经济关系已经由集中型初步恶化趋势向分散型恶化与协调并存状态。该时段共有 CDEFGHIJL9 种类型存在，ABK 种类缺失(表 5)。48 个冲突状态单元中，低、较低、中、较高冲突区分别占到 44%、21%、19% 和 17%，集中分布在长三角中部的上海、苏锡常、宁镇扬，以及嘉兴、绍兴东部和宁波南部地区，比较 9101 时段，虽然总数有所减少，但向高冲突方向的演化较为明显；42 个协调状态单元中，潜在危机区、低、较低、中、高协调区分别占 50%、14%、12%、10%、14%，集中在江苏板块东部和浙江板块西部地区，潜在危机区比例较 1991–2001 时段降低了 35%，其他类型比例却相应增长了 35%，表明协调区域的质量有了明显的改善(图 3h)。

4.2 长三角地区 EEH 空间分区

为了挖掘长三角地区 EEH 的空间分布规律，为区域生态—经济系统协调发展提供决策依据，有必要将研究结果进行区划。将长三角两个时段的生态—经济协调度指数 EEH9101 (a) 和 EEH0108 (b) 建立转换矩阵，进一步挖掘研究单元在 9108 时段内的 EEH 类型的转换情况，经过数据聚类将其分为 5 类区域：持续恶化区、初始恶化区、初始协调区、协调降低区、协调升级区(表 6，图 3i)。

表 6 长三角地区 EEH 空间变化格局

Tab. 6 Early warning district partition of EEH in Yangtze River Delta					EEH 特征
分区	标准	面积、占长三角百分比与范围			
持续恶化区 (I)	$\alpha < 0$ 、 $\beta < 0$ 且 $\beta > \alpha$	25873.76 km ² , 22.89%。青浦、宝山、桐乡、上海、武进、宝应、宁海、湖州、闵行、奉化、嘉定、常州、太仓、昆山、宜兴、江阴、金坛、南京、无锡、常熟、吴江、海宁、新昌、张家港、苏州、南汇。	上海市区、苏锡常地区、南京市、从 9101 时段到 0108 时段一直处于冲突状态，并且形势持续恶化。全部 26 个单元均由 F 转出，分别转为 C(4)、D(6)、E(4)、F(12)。		
初始恶化区 (II)	$\alpha < 0$ 、 $\beta < 0$	21248.99 km ² , 18.80%。平湖、嘉兴、嵊县、泰州、上虞、海盐、江都、溧阳、绍兴、松江、镇江、嘉善、丹阳、泰兴、射阳、扬中、绍兴、金山、丹徒、高淳、建湖、兴化。	苏锡常持续恶化区外围、绍兴与宁波边界区及扬盐泰部分地区，从 9101 时段的协调状态转变为 0108 时段的冲突状态，22 个单元中有 19 个由 G 转出，分别变为 C(4)、D(3)、E(5)、F(7)；平湖 (L-F)、嘉兴 (L-F) 和绍兴 (H-E) 变化幅度较大。		
协调降低区 (III)	$\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 且 $\beta < \alpha$	8467.21 km ² , 7.49%。萧山、海安、姜堰、诸暨、湖州、溧水。	分散于长三角南北两侧，从 9101 时段到 0108 时段一直处于协调状态，但协调度有所降低。6 个单元萧山、海安为 H-G，其余协调度均在同类型中降低。		
初始协调区 (IV)	$\alpha < 0$ 、 $\beta > 0$	37937.89 km ² , 33.57%。宿迁、富阳、临安、安吉、桐庐、杭州、仪征、德清、六合、阜宁、淳安、长兴、余杭、滨海、象山、崇明、浦东、高邮、句容、盐城、淮安、扬州、如东、南通。	长三角西部的两端，包括杭州与湖州西部、宁镇扬西部辖区、盐城北部及淮宿市区、南通中部地区。从 9101 时段的冲突状态转变为 0108 时段的协调状态，24 个单元中有 18 个由 F 转出，分别变为 G(3)、H(3)、I(4)、J(2)、L(5)，宿迁 (A-J)、安吉 (E-L)、德清 (E-I)、六合 (E-I) 变化幅度较大。		
协调升级区 (V)	$\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 且 $\beta > \alpha$	16982.06 km ² , 15.03%。建德、宁波、余姚、大丰、慈溪、泰兴、东台、酃县、海门、启东、如皋、靖江。	长三角南北沿海地区，包括盐城、南通、泰州和宁波的部分地区，从 9101 时段到 0108 时段一直处于协调状态，且协调度不断升级，其中建德 (G-L)、宁波 (G-J)、余姚 (G-J)、大丰 (G-H) 为跨类型升级，其余协调度均在同类型中升高。		

注：研究单元中不存在 $\alpha < \beta$ 且 $\beta < \alpha$ 情况，故不对其进行讨论；单元按生态经济协调度变化幅度由大到小排列。

整体来看，1991-2008 年间，研究单元间EEH 类型相互转换现象显著，但大频度转换主要集中在靠近临界点的F区和G区，表明目前长三角地区生态经济关系正处于矛盾多发且此消彼长的不稳定阶段，2001 年起两极分化现象开始显现，但尚没有出现大的生态恶化与生态修改状况。

4.3 长三角地区EEH演变模式

长三角地区 EEH 演变模式可总结为梯度模式与核心边缘模式共存。梯度模式可以分为两级，一级梯度模式表现在整个长三角区域可分为北中南三大横向梯度带，中间梯度带由上海、苏锡常与宁镇等 I、II 类区域组成，南北侧梯度带则主要由 III、IV、V 类区域组成；二级梯度模式表现在长三角南北两翼均由东中西三大纵向梯度带构成，中间梯度带主要由 I、II、III 类区域组成，东侧梯度带主要由 V 类区域组成，西侧则主要由 IV 类区域组成。核心边缘模式可以概括为 7 大组团：即苏锡常沪组团、南京组团、绍甬组团、苏北组团、泰州组团、杭州组团、南通组团，这些组团呈现明显的核心—边缘空间组合结构特征(图 4)。



Fig. 4 Spatial combination pattern of EEH in Yangtze River Delta

5 结论与讨论

(1) 1991 年以来长三角地区土地利用类型大幅度转换。城镇面积增长最大，来源主要是水田、旱地、草地、园地和其他用地；0108 时段土地利用结构变化大于9101 时段；2008 年草地、园地和其他3种用地类型已经所剩无几。

(2) ESV 模型显示，1991 年来长三角生态系统整体呈现恶化趋势，环太湖地区、宁镇扬和盐城东部、绍兴东部与宁波南部是ESV 明显下降的区域，浙江西南和江苏沿海地区ESV 明显上升，0108 时段恶化幅度有所减缓，同时证明水域、水田变为城镇和旱地的开发行为对生态系统稳定性具有极大伤害。

(3) 1991 年来 GDP 增长率呈现中、南部高北部低的格局，9101 时段南、中部明显高于北部地区，0108 时段中部明显高于南北。

(4) 依据EEH 指数将长三角划分为关系恶化区、高度冲突区、较高冲突区、中度冲突区、较低冲突区、低度冲突区、潜在

危机区、低度协调区、较低协调区、中度协调区、较高协调区、高度协调区等12类区域。整个长三角EEH空间特征为生态冲突区居中心区位，生态协调区居边缘区位，且按EEH由低到高呈现出明显的核心—边缘空间结构；9101时段长三角生态经济关系已经出现了集中型初步恶化趋势，但尚未达到剧烈恶化程度；0108时段则由集中型初步恶化趋势转向分散型恶化与协调并存状态。

(5) 对EEH9101和EEH0108指数建立转换矩阵，剖析两个时段各单元EEH演变情况，将长三角分为5种生态经济协调关系类型区：初始恶化区、初始协调区、持续恶化区、协调降低区、协调升级区。

(6) 长三角EEH演变中梯度模式与核心—边缘模式共存。其中一级梯度模式表现在长三角北中南三大横向梯度带，二级梯度模式表现在其南北两翼的东中西三大纵向梯度带；核心—边缘模式概括为7大组团：即苏锡常沪组团、南京组团、绍甬组团、苏北组团、泰州组团、杭州组团、南通组团，这些组团呈现同类不同构的核心—边缘空间组合模式。

表7 长三角地区EEH演变的空间组团
Tab. 7 Spatial group of EEH in Yangtze River Delta

组团	分布特征
苏锡常沪 嘉组团	以上海北部和苏锡常等持续恶化区为核心，北隔长江接Ⅳ、Ⅴ类区，南隔太湖接Ⅲ、Ⅳ类区，东西分别为上海南部、嘉兴北部与镇江、溧阳的初始恶化区。该组团为长三角地区经济水平最高的区域，也是EEH恶化最为严重的区域，并且表现出继续恶化的危险信号。
南京组团	以南京市中心区和浦口持续恶化区为核心，外接六合、仪征、句容Ⅳ类区和溧水Ⅲ类区。在南京市核心区与苏锡常持续恶化区的强大经济辐射作用下，外围的高淳已经进入初始恶化序列，该组团存在EEH恶化的危机。
绍甬组团	以奉化、新昌、宁海持续恶化区为核心，北侧宁波及周边县为Ⅴ类区，东侧象山为Ⅳ类区，西侧绍兴市大部为Ⅱ、Ⅲ类区。由于经济重心向西移动，组团EEH具有向西恶化延伸的趋势，但杭州组团对其有一定阻挡作用。
苏北组团	以宝应市持续恶化区为核心，外接建湖、兴化Ⅱ类区和高邮、盐城、阜宁、淮安Ⅳ类区，呈现多种类型区并存的格局。苏北经济发展水平整体较低，各单元协调程度比较分散，表明该组团多中心无序发展情况较为严重。
泰州组团	以泰州市区初始恶化区为核心，外接姜堰市Ⅲ类区，外围Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类区。该组团7个单元中有3个呈现出初步恶化趋势，2个单元协调度下降，表明泰州区域性中心集聚模式正在形成，EEH出现整体下降的信号。
杭州组团	以建德协调升级区为核心，外接面积广阔的Ⅳ类区，该组团EEH整体呈现好转趋势，表明其经济重心外移明显，只有外围Ⅲ类区湖州市区、萧山区、诸暨市在苏锡常与绍兴的辐射作用下出现EEH降低的趋势。
南通组团	以沿海城市启东和海门协调升级区为核心，外接Ⅳ类区南通市区和如东，外围Ⅳ类区如皋、东台和Ⅲ类区海安。该组团因长江阻挡目前尚处于EEH协调状态，苏通大桥的开通也为其带来了EEH下降的危机。

[参考文献] (References)

[1] Wu Dianting, Wu Hao, Jiang Ye. A research on influencing factors of carbon emission intensity. Geographical Research, 2011, 30(4): 579–589. [吴殿廷, 吴昊, 姜晔. 碳排放强度及其变化: 基于截面数据定量分析的初步推断. 地理研究, 2011, 30(4): 579–589.]

[2] Daily G C. Nature’s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.

[3] Sutton P C, Costanza R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation. Ecological Economics, 2002, 41: 509–527.

[4] Costanza R, d’Arge R, de Groot R et al.. The value of the world’s ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387, 253–260.

[5] Costanza R, Cumberland J, Daly H et al. An Introduction to Ecological Economics. FL, USA: St Lucie Press, 1997.

-
- [6] Lewandrowski J, Darwin R F, Tsigas M et al.. Estimating costs of protecting global ecosystem diversity. *Ecological Economics*, 1999, 29: 111-125.
- [7] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29: 293-301.
- [8] Woodward R T, Wui Y S. The economic value of wetland services: A meta-analysis. *Ecological Economics*, 2001, 37:257-270.
- [9] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics*, 2001, 39: 333-346.
- [10] Konarska K M, Sutton P C, Castellon M. Evaluating scale dependence of ecosystem service valuation: A comparison of NOAA-AVHRR and Landsat TM datasets. *Ecological Economics*, 2002, 41: 491-507.
- [11] Gil Pontius Jr R, Laura C Schneider. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85: 239-248.
- [12] 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: 1427-1435.
- [13] Helming K, Perez-Soba M, Tabbush P. *Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Press, 2008: 77-106.
- [14] Xie Gaodi, Zhen Lin, Zhang Caixia et al. Assessing the multifunctionalities of land use in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(4): 311-318.
- [15] Li Haitao, Liao Yingchun, Yan Maochao et al. Emergy evaluation and assessment of sustainability on the eco-econommic system of Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 765-772. [李海涛, 廖迎春, 严茂超等. 新疆生态经济系统的能值分析及其可持续性评估. *地理学报*, 2003, 58(5): 765-772.]
- [16] Su Fei, Zhang Pingyu. Assessment of coordinative development between economy and environment based on ecosystem service values change: A case of Daqing City. *Progress in Geography*, 2009, 28(3): 471-477. [苏飞, 张平宇. 基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调度发展评价: 以大庆市为例. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 471-477.]
- [17] Peng Jian, Wang Yanglin, Chen Yanfei et al. Economic value of urban ecosystem services: A case study in Shenzhen. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2005, 41(4): 594-604. [彭建, 王仰麟, 陈燕飞等. 城市生态系统服务功能价值评估初探: 以深圳市为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(4): 594-604.]
- [18] Nuñez D, Nahuelhual L, Oyarzún C. Forests and water: The value of native temperate forests in supplying water for human consumption. *Ecological Economics*, 2006, 58: 606-616.
- [19] Mo Hongwei, Ren Zhiyuan, Xie Hongxia. Relation between land use/cover change and changes of ecological effect in wind drift sand region. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2005, 33: 110-114.

[莫宏伟, 任志远, 谢红霞. 榆阳区土地利用和生态效应变化分析. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 110-114.]

[20] Dai Quanhui, Liu Guobin, Jiang Xuewei et al. An evaluation on sustainable development of eco-economic system in small watershed in hilly area of Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 209-218. [戴全厚, 刘国彬, 刘明义等. 小流域生态经济系统可持续发展评价. 地理学报, 2005, 60(2): 209-218.]

[21] Fang Chuanglin, BAO Chao. The coupling model of water-ecology-economy coordinated development and its application in Heihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 781-790. [方创琳, 鲍超. 黑河流域水—生态—经济发展耦合模型及应用. 地理学报, 2004, 59(5): 781-790.]

[22] Liu J Y, Deng X Z. Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC, 2010. *Chinese Science Bulletin*, 55: 1354-1362.

[23] Gao Qun. Overview on ecological-economic integration model research. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(3): 375-384. [高群. 国外生态—经济系统整合模型研究进展. 自然资源学报, 2003, 18(3): 375-384.]

[24] Li Xiubin. A review of the international research on land use/land cover change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(6): 553-558. [李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆盖变化的国际动向. 地理学报, 1996, 51(6): 553-558.]

[25] Liu Jiuyan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang et al. Remote Sensing Information Study of Land Use Change in China in 1990s. Beijing: Science Press, 2005. [刘纪远, 张增祥, 庄大方等. 20 世纪90 年代中国土地利用变化的遥感时空信息研究. 北京: 科学出版社, 2005.]

[26] Aspinall R. Modeling land use change with generalized linear models: A multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley, Montana. *J. Environ. Manage.*, 2004, 72: 91-103.

[27] Benson C S, Jessica M C, Darius J S. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services. *Applied Geography*, 2010, 8: 1-13.

[28] Ning Yuemin, Shi Qing, Zha Zhiqiang. Research on the mechanism and inter-regional planning of the Yangtze Delta interlocking metropolitan areas. *City Planning Review*, 1998, (1): 16-32. [宁越敏, 施倩, 查志强. 长江三角洲都市连绵区形成机制与跨区域规划研究. 城市规划, 1998, (1): 16-32.]

[29] Fang Chuanglin, Liu Haiyan. The spatial privation and the corresponding controlling paths in China's urbanization process. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(8): 849-860. [方创琳, 刘海燕. 中国快速城市化进程中的区域剥夺行为及调控路径. 地理学报, 2007, 62(8): 849-860.]

[30] Tu Xiaosong, Pu Lijie. Spatio-temporal pattern of land use change and its eco-environmental response in Suzhou-Wuxi-Changzhou Region. *Geographical Research*, 2008, 27(3): 584-594. [涂小松, 濮励杰. 苏锡常地区土地利用变化时空分异及期生态环境响应. 地理研究, 2008, 27(3): 584-594.]

[31] Xiang Wusheng, Li Xiankun, Ding Tao et al. Effects of land use changes on eco-service value in Lijiang

River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(6): 46-50, 55. [向悟生, 李先琨, 丁涛等. 土地利用变化对漓江流域生态服务价值影响. *水土保持研究*, 2009, 16(6): 46-50, 55.]

[32] Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613. [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. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.]

[33] Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919. [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. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.]