

# 长三角地区城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制研究

杨清可<sup>1</sup>, 段学军<sup>2,3\*</sup>, 王磊<sup>2,3</sup>, 王雅竹<sup>2,3</sup>

(1. 南京财经大学公共管理学院, 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;  
3. 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 论文以“长江三角洲城市经济协调会”内16个核心成员城市作为典型案例, 构建城市土地利用与生态环境效应评价指标体系, 运用灰色关联评价模型探究2000—2015年间城市土地利用与生态环境效应的时空演变规律与耦合度变化, 解析系统间交互作用机制。结果表明: ① 长三角地区城市土地利用指数不断增加, 社会经济发展与土地利用开发均起到正向促进作用。社会经济发展对城市生产、生活空间和环境质量产生更多需求, 建设用地扩张、耕地面积被侵占、人口承载增大也是导致城市土地利用指数上升的重要因素。② 区域生态环境质量整体表现平稳, 效应映射到空间上, 变化幅度与演变特征明显。浙江省的城市生态环境质量高于上海与江苏的城市, 这与环境自净能力、污染处理设施建设以及生态保护理念的宣传等因素相关。③ 城市土地利用与生态环境效应耦合度较低的城市占多数, 处于失调状态。城镇化进程中用地扩张呈现低密度、分散化倾向, 对生态安全和环境质量扰动强烈, 导致城市土地利用与生态环境保护的空间偏离度加大。④ 城市土地利用系统与生态环境系统各要素间存在较强的相互作用关系, 要素胁迫与约束作用强度大小差异明显。

**关键词:** 城市土地利用; 生态环境效应; 交互作用机制; 长三角地区

城市土地作为人类活动重要的物质载体, 其空间范围上的扩张是社会经济发展进程中在地域形态上的直接表现形式, 逐渐成为城市发展与土地利用研究的关注焦点<sup>[1-4]</sup>。同时, 作为城市化重要表征, 城镇空间扩展及其伴随的高强度人类活动和不合理土地利用, 对生态安全造成多方面负面影响, 包括生态系统的功能衰退、生物多样性的降低与动植物生存源地的破坏<sup>[5]</sup>, 是影响城市和区域可持续发展的关键因素<sup>[6-7]</sup>。城市建成区周围多分布优质耕地、郁闭度较大的林地, 生态环境保护作用显著, 未来城市用地开发侵占生态用地威胁着生物多样性与环境质量<sup>[8-9]</sup>。另一方面, 生态环境系统为城市

经济的稳定运行提供支撑, 生态破坏与环境污染增大城市发展风险, 制约土地利用的强度与速度<sup>[10]</sup>。梳理已有进展, 研究内容集中在3个方面: ① 从城市土地利用变化的生态环境效应综合评价的视角切入, 以面板数据和多尺度空间分析为基础, 解析城市用地与生态环境二者相互作用的动力机制<sup>[11]</sup>。部分研究还试图构建“PSR模型”来探寻测度生态环境效应评价的新方式<sup>[12-13]</sup>。② 考虑生态环境的约束作用, 从建设用地供需、生态安全格局、空间结构管理等方面开展城市增长边界的科学划定, 解决城市发展过程中用地需求与生态环境安全保护协调的问题<sup>[14]</sup>。同时, 探究协调城市地域推进与环境质量

收稿日期: 2020-02-08; 修订日期: 2020-03-27。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100101); 国家自然科学基金项目(41601169); 江苏高校哲学社会科学研究项目(2020SJA0276)。[Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2018YFD1100101; National Natural Science Foundation of China, No. 41601169; Project of Philosophy and Social Science Research in Colleges and Universities in Jiangsu Province, No. 2020SJA0276.]

第一作者简介: 杨清可(1986—), 男, 山东滕州人, 讲师, 从事区域规划与土地利用研究。E-mail: yangqingke66@163.com

\*通信作者简介: 段学军(1970—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事区域开发与可持续发展研究。E-mail: xjduan@niglas.ac.cn

引用格式: 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 长三角地区城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制研究[J]. 地理科学进展, 2021, 40(2): 220-231. [Yang Qingke, Duan Xuejun, Wang Lei, et al. Mechanism of interaction between urban land expansion and ecological environment effects in the Yangtze River Delta. Progress in Geography, 2021, 40(2): 220-231.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.02.004

管控的新模式,实现生态保护前提下的城市健康发展<sup>[15]</sup>。③从空间关联性视角分析城市土地利用对景观格局、资源环境、生态足迹占用等方面引发的生态环境效应,以及对水土资源、水文水情等某种生态现象产生的胁迫作用<sup>[16-18]</sup>;与之对应,生态保护和环境治理措施,如生态空间保护、退耕还林(草)、生态修复、污染控制及相应政策的完善等,使得土地开发压力及其带来的负面效应得到缓解,生态环境质量呈现改良的趋势<sup>[17,19]</sup>。因此,城市土地利用下生态环境效应变化具有不确定性和非线性特征,受到利用模式、具体评价指标等因素的影响,需要开展更有针对性的研究探索和案例分析。

总体来看,在遥感解译、空间模型等技术方法支撑下,已有研究拓展了城市土地利用与生态环境效应分析的多维视角,明确了两系统间相互协调与约束作用研究的重要性。但目前受限于研究方法 & 城市生态环境系统的复杂性,研究多侧重于从单个生态环境要素出发解析城市土地利用的基本情况,仍需深化对生态环境影响的探究;多以小城市或生态脆弱地区为主,而从区域尺度上对于发达地区城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制缺乏分析。

长三角地区作为“一带一路”与长江经济带两大国家战略的重要衔接地带,是中国参与国际竞争的关键平台和经济社会发展的重要引擎。随着长三角地区城镇化建设与工业化转型升级的深入推进,城市土地扩张速度与开发强度逐渐提高,土地利用过程中存在部分空间无序蔓延、侵占绿色生态用地严重、集约利用程度较低等问题。因此,开展长三角地区城市土地利用与生态环境效应交互作用机制研究,对于协调区域内优化城市土地利用与生态环境保护具有借鉴意义。因此,本文以长三角地区作为研究对象,以保护生态环境为出发点,对城市土地利用与生态环境效应的时空演变特征进行定量评价,解析两系统间耦合度演变特征与交互作用的机制,以期协调人地关系、促进城市土地管理模式向质量—生态管护转变提供科学借鉴。

## 1 方法与数据

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 构建评价指标体系

城市土地利用系统与生态环境系统各要素之间存在紧密的联系和互动/反馈<sup>[20]</sup>。随着城市化与

工业化进程的不断深化,对城市用地合理开发与空间布局提出更高要求,产生的压力驱动着土地利用结构、用地规模以及承载人口总量的变化,用地扩张的本质是城市内部的经济社会发展、人口空间集聚和产业转型升级。将城市土地承载的社会经济活动与土地利用的基本情况等2部分要素共同表征城市土地利用系统<sup>[21-22]</sup>。对于生态环境效应系统,为应对源自土地利用结构、开发方式变化与人类活动等多种形式的扰动,在系统自我调节与人类客观管控的作用下产生适应性的响应<sup>[23-24]</sup>。因此,参考相关成果<sup>[13,25-27]</sup>,构建包含城市土地系统与生态环境系统等2个系统、8个功能团、共23个指标的多层次评价模型,应用到城市土地利用与生态环境关联关系判断与机制研究(表1)。

对相应指标的选择:①城市土地利用系统中,居民生活与消费的变化、产业结构转型与升级都会对城市土地利用结构和开发强度产生影响<sup>[3,28-29]</sup>。其中,社会发展水平通过城镇发展水平、居民生活水平、科学技术水平来体现,经济发展水平则可通过人均GDP、产业结构、投资强度来进行表示。城市用地在规模和结构上的变化是对土地利用状态的全面反映,可以从横向的开发现状和纵向的利用效益等两方面来表征,建设用地占比与人均耕地变化是体现土地利用现状最为直观的指标;建设用地产出、公共财政收入及承载人口的强度则是表征土地利用效益最具代表性的指标。②生态环境效应系统中,由生态环境情况、环境负荷水平、资源能源消耗以及环境管理能力等方面要素确定,选取能够体现区域生态资源总量、污染物排放强度、资源消耗程度、环境治理力度中的典型指标来表示。为解决指标量纲类型不同而无法进行对比的问题,采用极差标准化法对数据进行无量纲化处理,其中:正向指标  $X'_{ij} = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$ , 逆向指标  $X'_{ij} = (X_{i\max} - X_{ij}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$ ;利用AHP-熵权法对指标赋权,加权求和计算城市土地利用指数(C)与生态环境效应指数(E),测算模型为:

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i \times X_i \quad (1)$$

式中:Y是总得分; $w_i$ 是第*i*个指标权重; $X_i$ 是指标的标准化数值;*n*是指标数目。

#### 1.1.2 交互作用机制模型

考虑到城市土地空间扩张与生态环境间交互作用的复杂性,采用能全面分析系统多因素之间作

表1 城市土地利用与生态环境效应评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of urban land expansion and effect on the ecological environment

类型	功能团	指标层	权重	作用方向
城市土地 利用系统	社会发展水平(C <sub>1</sub> )	城镇化率(C <sub>11</sub> )	0.028	+
		城镇居民人均可支配收入(C <sub>12</sub> )	0.032	+
		人均科研投入(C <sub>13</sub> )	0.056	+
	经济发展水平(C <sub>2</sub> )	人均GDP(C <sub>21</sub> )	0.082	+
		第三产业比重(C <sub>22</sub> )	0.032	+
		地均固定资产投资(C <sub>23</sub> )	0.108	+
	土地利用现状(C <sub>3</sub> )	人均耕地面积(C <sub>31</sub> )	0.029	+
		建设用地面积占比(C <sub>32</sub> )	0.042	+
		单位用地面积投资强度(C <sub>33</sub> )	0.033	+
	土地利用效益(C <sub>4</sub> )	单位建设用地产出(C <sub>41</sub> )	0.042	+
		地均公共财政收入(C <sub>42</sub> )	0.037	+
		常住人口密度(C <sub>43</sub> )	0.026	+
生态环境 效应系统	生态环境现状(E <sub>1</sub> )	城市森林覆盖率(E <sub>11</sub> )	0.052	+
		人均城市绿地面积(E <sub>12</sub> )	0.033	+
	环境负荷水平(E <sub>2</sub> )	人均工业废水排放量(E <sub>21</sub> )	0.022	-
		人均工业SO <sub>2</sub> 放量(E <sub>22</sub> )	0.019	-
		人均工业烟尘排放量(E <sub>23</sub> )	0.037	-
	资源消耗程度(E <sub>3</sub> )	人均全年用电量(E <sub>31</sub> )	0.045	-
		人均能源消耗量(E <sub>32</sub> )	0.052	-
		人均供水量(E <sub>33</sub> )	0.063	-
	环境治理力度(E <sub>4</sub> )	工业固体废物综合利用率(E <sub>41</sub> )	0.051	+
		城镇生活污水处理率(E <sub>42</sub> )	0.037	+
		生活垃圾无害化处理率(E <sub>43</sub> )	0.042	+

注: + 指正向作用; - 指逆向作用。

用机制的灰色关联评价模型<sup>[30]</sup>,研究两系统内各要素间动态演变规律,开展城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制分析,识别系统内相互影响的关键因子。模型如下:

$$\xi_i(j)(t) = \frac{\min_j \min_t |Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)|}{|Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^X(t) - Z_j^Y(t)|} \quad (2)$$

式中:  $\xi_i(j)(t)$  是  $t$  时期的灰色关联系数;  $Z_i^X(t)$ 、 $Z_j^Y(t)$  分别是  $t$  时期各城市两系统内指标的标准化值;  $\rho$  是分辨系数,一般取值0.5。

处理各时间节点的截面数据,求取样本关联系数的均值,得到表征城市土地利用与生态环境效应系统内指标联系大小的关联度矩阵  $\gamma$ 。其中关联度  $\gamma_{ij}$  的取值区间为[0, 1],其值越大,关联度越大,耦合度越强;反之亦然。借鉴刘耀彬等<sup>[10]</sup>对耦合度概念的界定,当  $0 < \gamma_{ij} \leq 0.35$  时,要素间关联性低;

$0.35 < \gamma_{ij} \leq 0.65$  时,关联性中等;  $0.65 < \gamma_{ij} \leq 0.85$  时,关联性高;  $0.85 < \gamma_{ij} \leq 1$  时,指标间关联性极高。

$$\gamma = \begin{matrix} & Y_1 & \cdots & Y_l \\ \begin{matrix} X_1 \\ \vdots \\ X_m \end{matrix} & \begin{vmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1l} \\ \vdots & \gamma_{ij} & \vdots \\ \gamma_{m1} & \cdots & \gamma_{ml} \end{vmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

式中:  $\gamma_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k \xi_i(j)(t)$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ),  $k$  指样本数;  $m$ 、 $l$  指城市土地利用系统与生态环境效应系统内的指标数。利用该式能通过横向截面数据求取指标间空间影响程度,还能通过纵向时间序列数据确定样本之间的时序演变特征。

运用式(4)求取城市土地利用系统各功能团/指标层中对应的生态环境系统内全部因子的关联程度的均值,根据结果大小与取值区间识别城市土地利用作用于生态环境上的关键胁迫因子。同理,可以识别出生态环境效应系统作用于城市土地利用的关键约束因子。模型如下:



$$\begin{cases} d_i = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \gamma_{ij} & (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, l) \\ d_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma_{ij} & (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, l) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $d_i$  和  $d_j$  分别为城市土地利用与生态环境指数。为了判断2个系统的耦合程度,在式(3)的基础上进一步构建城市土地利用与生态环境效应相互关联的耦合度模型。运用此模型从时间与空间2个维度精确评价两系统间耦合协调度。模型如下:

$$A(t) = \frac{1}{m \times l} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l \xi_i(j)(t) \quad (5)$$

式中:  $A(t)$  指耦合度。

## 1.2 研究区域与数据来源

本文以长三角地区作为研究对象,选取的研究范围为“长江三角洲城市经济协调会”内16个核心成员城市,包括上海市、江苏省8市(南京、镇江、常州、无锡、苏州、扬州、泰州和南通)、浙江省7市(杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、台州和舟山)。土地利用数据集来源于国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>),运用ENVI 5.3软件对遥感数据进行监督解译分类,提取并矢量化城镇用地、农村居民点与其他建设用地数据,将其重分类处理并合并为城市土地,最后利用直方图工具计算得到城市土地面积。省界、市界、各级政府驻地、各级道路、河流等数据来自于国家基础地理信息系统全国1:400万数据库(<http://nfgis.nsd.gov.cn>)。经济社会数据来源于2001—2016年间的《江苏统计年鉴》《浙江统计年鉴》《上海统计年鉴》等统计资料,以及相应年份的各市国民经济和社会发展统计公报。

## 2 结果分析

### 2.1 城市土地利用与生态环境效应时空演变

#### 2.1.1 城市土地利用动态演变

长三角地区城市土地利用指数逐年增加,由2000年的0.083升至2015年的0.272,年均增幅8.2%。尤其是上海、宁波、杭州、南京等中心城市,经济发展对城市土地利用起到促进作用,指数较高。其中,社会进步和经济发展对城市生产、生活空间与生态环境容量均产生巨大需求,土地利用压力的增大也是城市共同面临和亟需解决的问题。土地利用现状方面,城市土地急剧扩张、生态用地被侵占、人口空间承载增大也是导致城市土地利用

指数上升的关键因素。土地利用现状指数相对稳定,但仍有下降趋势,如杭州、南京等城市,降幅分别为27.2%和5.0%。土地利用效益增长较快,尤以镇江(82.5%)、南京(80.1%)、嘉兴(78.5%)与扬州(77.7%)等城市为最,对城市压力的影响由面积数量向用地深度转变。

城市土地利用指数的空间格局演变差异明显(图1),但各阶段格局变化较小。最高的上海(0.249)是最低的泰州(0.136)的1.83倍,土地利用呈高度不均衡状态,“中心—外围”的格局特征显著。其中,高值区主要位于上海、南京、杭州、宁波等城市,沿“沪宁—沪杭—杭甬”等铁路沿线,呈“Z”字型轴线布局,土地利用产生的压力高于外围的泰州、扬州、台州,此类城市经济体量大、人口分布集中、产业布局密度高,对城市土地的需求强烈。而外围城市经济质量还需提升,第三产业发展层次低,集聚人口与吸引项目的能力弱,社会经济发展对城市土地利用的驱动作用较低。

#### 2.1.2 生态环境效应变化趋势

从时间序列看,长三角地区城市环境负荷水平和资源能源消耗大幅提高,但由于森林面积与绿化面积的增加,以及各城市加强环境治理强度与生态保护力度,城市生态环境质量下降有限。具体到城市,苏州、杭州、泰州、镇江、常州与南京等6市效应指数有所减小,生态环境质量降低,其余城市则持续上升。其中,苏州市指数由2000年的0.291降至2015年的0.208,降幅最大;该市城镇化速度较快,建设用地面积扩张2.3倍;电力、能源与水资源的消耗量和工业污水排放量成倍增加,有毒废弃物和固体废物的排放增长近2.5倍,恶化了城市生态环境质量。改善的为嘉兴、台州、舟山、绍兴等城市,指数增幅超过10%。

空间分布上,生态环境效应指数变化较大,最高的台州市为最低的上海市的2.39倍(图2)。2000年高值区位于浙东地区的湖州与杭州,而太湖流域的上海、苏州与无锡等市,工业废弃物与生活污染大量排放,超过城市环境容量,质量指数较低。2005与2010年,高值区范围扩大,湖州、绍兴与台州等市森林覆盖率高、生态保护理念深入,生态环境质量较好,得分较低仍为沪宁沿线城市。至2015年,低值区位于上海与江苏所属城市,而浙江所属城市生态环境质量较好。究其原因,上海与江苏的城市多为平原区,环境自净能力弱,污染处理设施



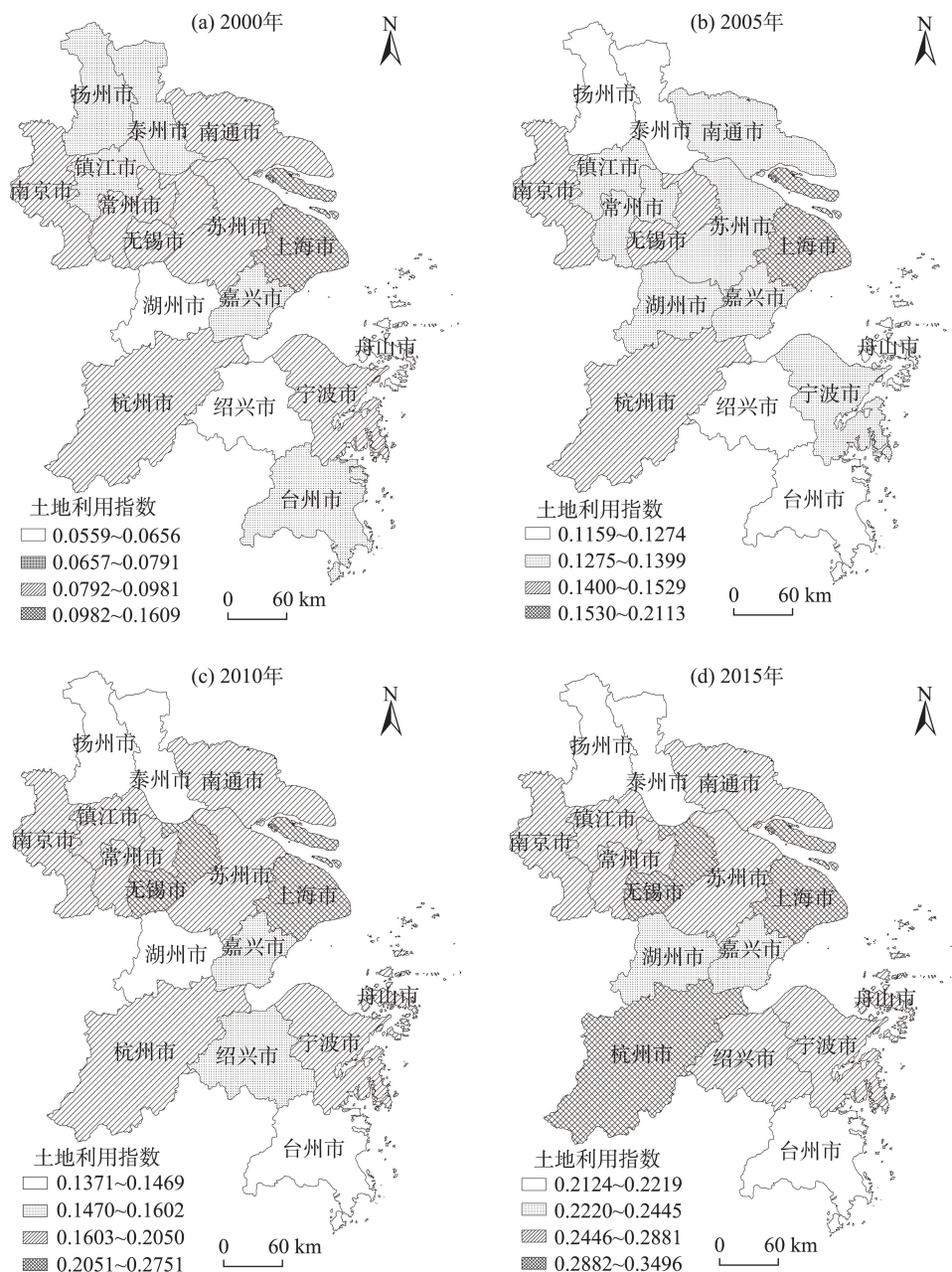


图1 长三角地区城市土地利用指数空间变化

Fig.1 Spatial change of urban land expansion in the Yangtze River Delta

建设不足,导致经济发展与城市建设过程中产生的污染物未能及时消解。

## 2.2 城市土地利用与生态环境耦合特征分析

城市土地利用与生态环境效应各要素的复杂交错性与时空变化特征,是两系统间耦合关联的非线性叠加和具体反馈,表现特征如图3所示:2000—2015年为长三角地区城市社会经济转型的关键时期,城市土地利用结构、经济社会效益与生态环境质量的变化,受到社会发展水平、人口空间分布、产

业转型升级与城市扩张模式等因素的共同作用。运用耦合模型进行测算,城市土地利用与生态环境效应的耦合强度空间差异较大。

(1) 耦合度大于0.8的城市主要为南京、杭州、苏州、无锡、宁波等。上述城市经济发达,城镇化水平较高,基础设施建设、人居生活改善对土地需求旺盛,但由于重视土地的高效集约开发,生态环境保护政策健全并执行到位,使得耦合程度保持较高。

(2) 耦合度低值区集中在苏中的扬州、泰州以

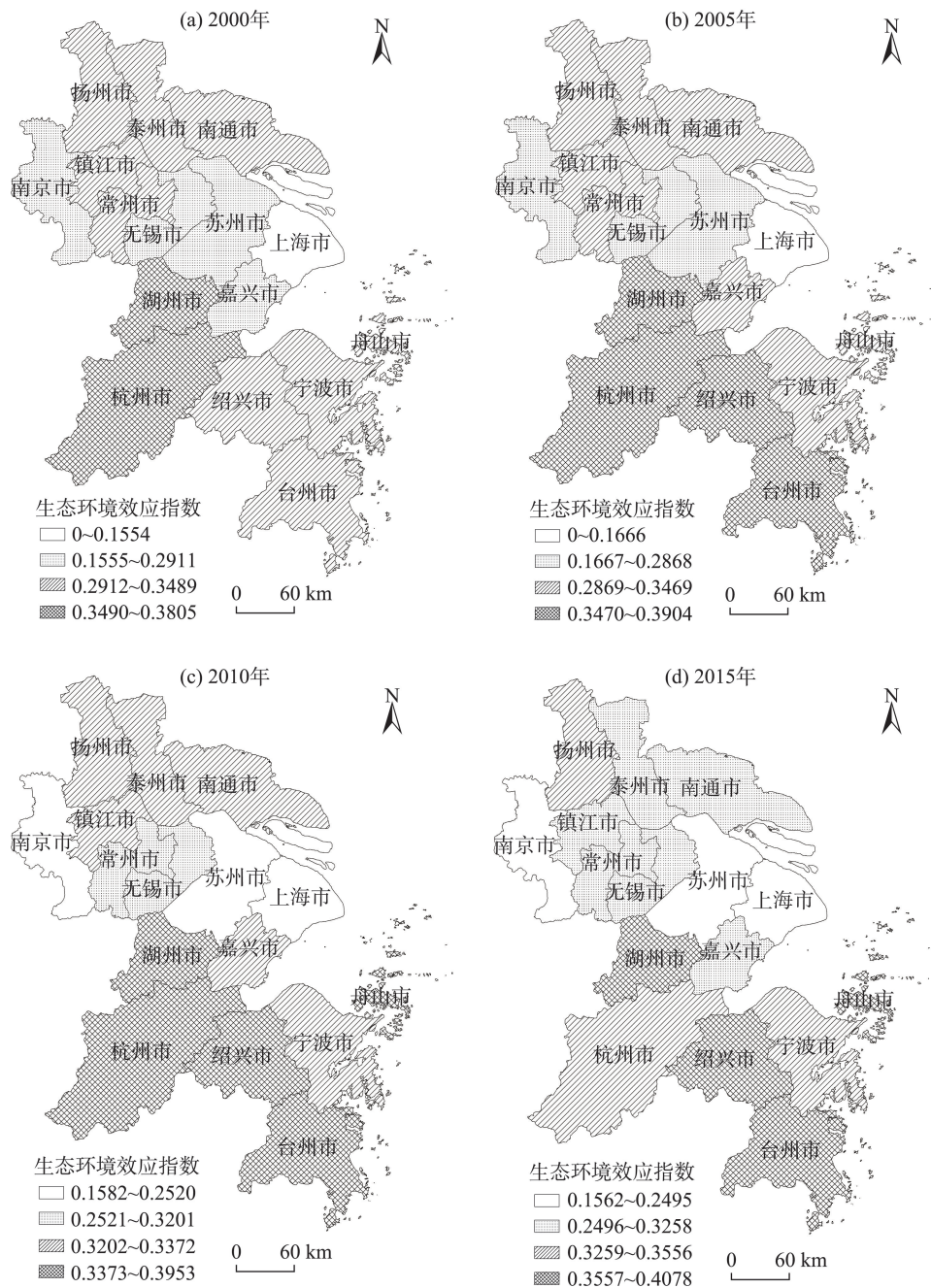


图2 长三角地区生态环境效应指数空间变化

Fig.2 Spatial change of ecological environment effect in the Yangtze River Delta

及浙江的湖州、台州等地。此类地区经济发展相对落后,产业结构单一,工业化和城镇化处于发展阶段,人口集聚能力弱,土地扩张缓慢,生态环境指数较高,使得城市土地利用与生态环境保护的耦合度较低。

(3) 时间维度上,耦合度一直处于动态变化中,其中2000年的耦合度值最低,为0.534,2005年达到最高,为0.710,至2015年又降至0.643,呈现“倒U

型”变化趋势。处于分离阶段的低值区不断强化,涵盖的城市有所增加,差异性特征明显。城市土地呈现空间低密度、布局分散化的扩张态势,侵占了周边大面积生态用地。城镇化与工业化发展粗放,对环境质量产生严重的外部负效应,导致城市土地利用与生态环境保护之间的偏离程度加大。

### 2.3 城市土地利用与生态环境交互作用机制

运用式(2)和(4)测算长三角地区城市土地利用



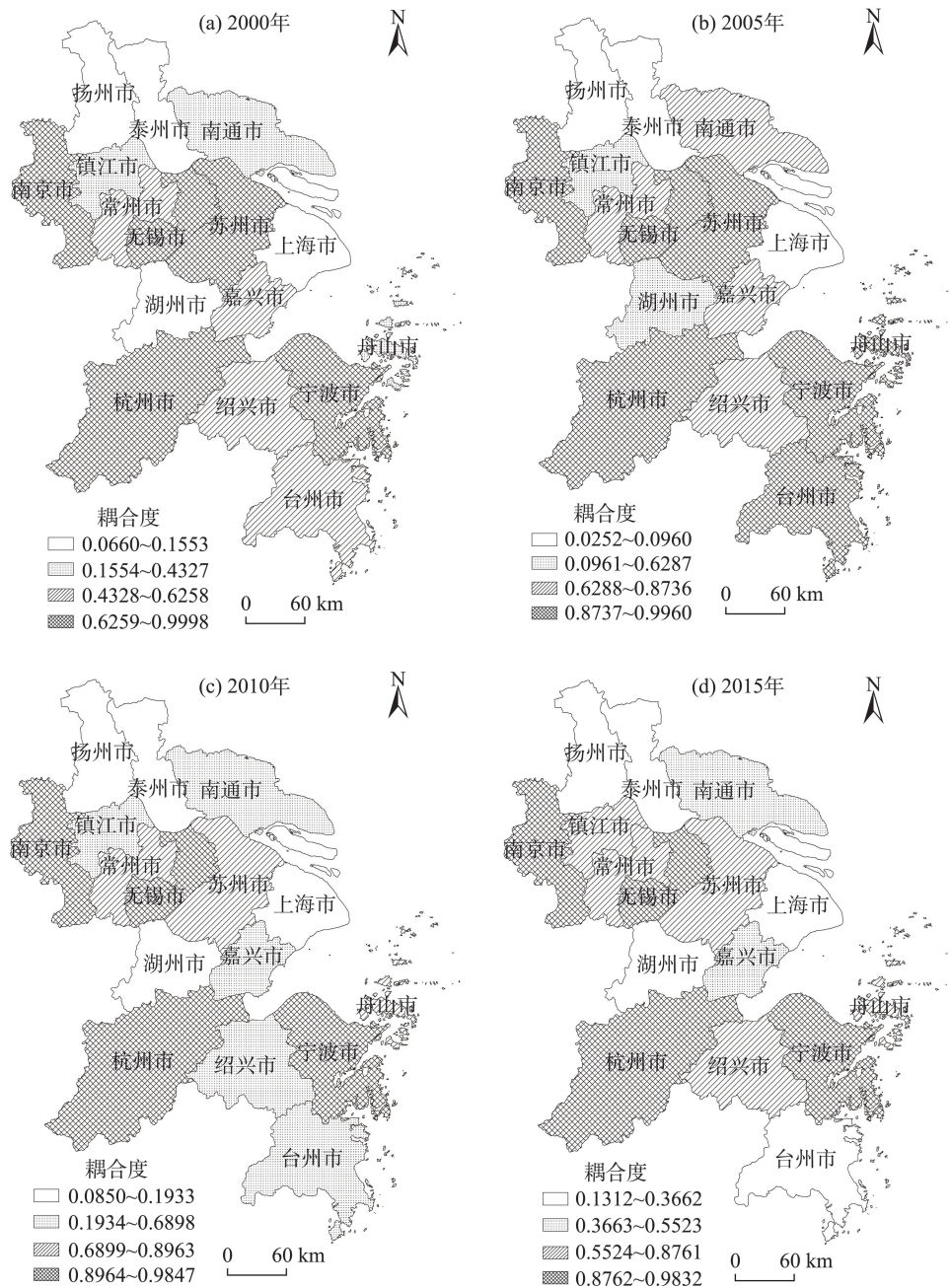


图3 城市土地利用与生态环境效应耦合度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of coupling degrees between urban expansion and ecological environment effects

与生态环境效应系统内各因素之间关联度大小,求取不同年份、不同城市的因素关联程度的均值,得到各因素与功能团的关联度矩阵表,明确城市土地利用对生态环境质量造成胁迫作用的主要因素,识别生态环境对城市空间扩张产生限制作用的关键因素。表2中结果显示关联度介于[0.442, 0.739],具有中等、较高的关联程度,表明两系统内部要素之间相互作用强度较大。

### 2.3.1 城市土地利用对生态环境的胁迫作用

城市土地利用各因素对生态环境的胁迫作用较大,有3个因素较为显著:城镇居民人均可支配收入(0.613)、人均耕地面积(0.610)和建设用地面积占比(0.593),此间链接过程则是通过城市居民生活水平、后备资源状况和土地开发强度作用于城市生态安全与环境质量。对于各功能团,社会进步、经济发展水平、土地利用现状、土地利用效益与生态环



表2 城市土地利用与生态环境效应各因素关联度矩阵

Tab.2 Matrix of relevance degree between urban land expansion and ecological environment effects

因素		$E_1$ (0.711)		$E_2$ (0.671)			$E_3$ (0.741)			$E_4$ (0.691)			$\bar{X}$
		$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{21}$	$E_{22}$	$E_{23}$	$E_{31}$	$E_{32}$	$E_{33}$	$E_{41}$	$E_{42}$	$E_{43}$	
$C_1$ (0.520)	$C_{11}$	0.614	0.638	0.508	0.522	0.535	0.531	0.506	0.464	0.530	0.602	0.520	0.543
	$C_{12}$	0.695	0.670	0.598	0.590	0.608	0.593	0.587	0.573	0.597	0.647	0.592	0.613
	$C_{13}$	0.644	0.640	0.540	0.529	0.552	0.527	0.518	0.530	0.557	0.623	0.561	0.566
$C_2$ (0.642)	$C_{21}$	0.610	0.633	0.537	0.552	0.575	0.536	0.515	0.523	0.579	0.655	0.536	0.568
	$C_{22}$	0.649	0.664	0.499	0.516	0.549	0.514	0.496	0.447	0.524	0.564	0.498	0.538
	$C_{23}$	0.693	0.693	0.544	0.555	0.589	0.540	0.525	0.475	0.540	0.565	0.492	0.565
$C_3$ (0.486)	$C_{31}$	0.663	0.646	0.600	0.603	0.604	0.598	0.595	0.595	0.616	0.634	0.555	0.610
	$C_{32}$	0.548	0.550	0.579	0.565	0.574	0.564	0.558	0.519	0.581	0.621	0.530	0.562
	$C_{33}$	0.442	0.473	0.649	0.638	0.592	0.644	0.634	0.575	0.650	0.665	0.564	0.593
$C_4$ (0.452)	$C_{41}$	0.710	0.731	0.534	0.541	0.587	0.528	0.512	0.466	0.547	0.611	0.510	0.571
	$C_{42}$	0.605	0.605	0.530	0.531	0.566	0.531	0.509	0.500	0.521	0.538	0.507	0.540
	$C_{43}$	0.739	0.736	0.563	0.558	0.615	0.536	0.522	0.491	0.553	0.559	0.535	0.582
$\bar{Y}$		0.634	0.640	0.557	0.558	0.579	0.554	0.540	0.513	0.566	0.607	0.533	

境效应系统的关联度历年均值分别为0.520、0.642、0.486、0.452。相较而言,经济发展水平对生态环境的胁迫作用大于其他功能团,说明现阶段由经济发展带来的城市土地扩张、生态景观改变、人口空间集聚是制约城市生态安全与环境质量提升的主要因素,用地结构不合理产生的效率低下等问题对生态环境造成的损害同样严重(图4)。

通过长时间尺度的纵向观察,各功能团因素对生态环境质量的胁迫作用增大,表明社会经济发展与城市土地利用中的生态安全保护意识仍亟待提高,未来应着力推进绿色低碳发展,以形成城市土地利用和生态环境保护相协调的空间格局,以期扭转生态环境恶化趋势。因此,应控制城市增长边界,限制对生态空间的侵占,通过规划调控和土地

市场监管解决城市土地粗放利用,减弱对生态环境的破坏。但是短期内无法打破城乡发展差异,城市作为人财物的集散地,对劳动力、资本与技术的空间集聚效应明显,空间扩张与开发强度的增大依然是各城市需要面临的问题,土地利用对生态环境的胁迫作用将会长期存在。

2.3.2 生态环境对城市土地利用的约束作用

生态环境系统对城市土地利用的约束作用也同样显著,作用强度最大的3项指标分别为人均城市绿地面积(0.640)、城市森林覆盖率(0.634)、城镇生活污水处理率(0.607)。各功能团约束强度的大小则表现为(图5):资源消耗程度(0.741)>环境治理力度(0.711)>环境负荷水平(0.691)>生态环境现状(0.671);各功能团内部因素对城市土地利用的空间

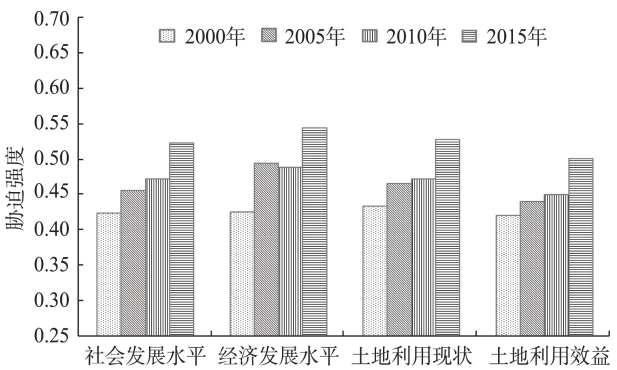


图4 长三角地区城市土地利用对生态环境的胁迫作用  
Fig.4 Stressing effect of urban land expansion on the ecological-environment in the Yangtze River Delta

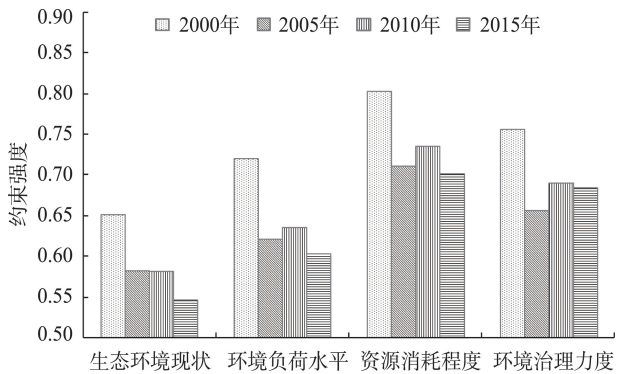


图5 长三角地区生态环境对城市土地利用的约束作用  
Fig.5 Restraining effect of ecological environment on urban land expansion in the Yangtze River Delta

扩张的限制程度却呈下降趋势。

长三角地区生态绿色空间、水源保护和供水、土壤环境质量等基础生态状况条件的恶化制约了城市空间布局与产业优化建设,成为降低城市土地利用效益的重要因素。环境管制能力与污染治理力度对生态条件的改善起到关键作用,高效的管制能力可以降低城市空间生产与居民生活活动对生态环境质量带来的负效应,生态环境对城市土地利用的约束作用不断降低。但是,当前长三角地区城市生产技术水平低与生态环境治理能力落后制约了生态破坏现状的改善,而高昂的污染治理成本与生态保护投入占用了有限的社会发展资金,提高了经济质量进步的成本,约束了城市土地的集约开发。

### 3 结论与讨论

本文以长三角地区为研究对象,以城市土地利用与生态环境的相互关系为切入点,定量探究城市土地利用与生态环境效应的时空演变规律与耦合度变化特征,分析系统间交互作用机制,主要结论为:

(1) 研究期内,长三角地区城市土地利用指数不断增加,核心城市土地扩张较快,社会经济发展与土地利用均起到促进作用。其中,社会进步和经济发展对城市生产、生活空间与生态环境容量均产生巨大需求,土地利用压力的增大也是城市亟需解决的问题。土地利用现状方面,建设用地扩张、生态用地被侵占、人口承载增大是导致土地利用指数上升的重要原因。

(2) 长三角地区城市资源消耗量和环境污染物排放量增幅较大,但由于城市森林面积与绿化面积的增加,以及近年来城市加强环境治理与生态保护力度,整体上生态环境质量并未表现出大幅下降。生态环境效应指数映射到空间上,变化幅度与特征演变较为显著。低值区多分布在上海与江苏的城市,而浙江所属城市森林覆盖率高、生态保护理念深入,生态环境质量较好。

(3) 2000—2015年间,城市土地利用与生态环境效应耦合的非线性叠加与反馈不仅体现在两系统内各要素相互作用的复杂交错性上,而且在时空发展变化的阶段性上也有充分体现。耦合度较低的城市占多数,未能有效协调城市土地高效利用与生态环境保护之间关系,两系统关系处于失调状

态。城镇化进程中用地扩张呈现低密度、分散化倾向,对生态安全和环境质量扰动剧烈,耦合度的格局差异将长期存在。

(4) 长三角地区城市土地利用系统中,社会进步、经济发展、土地利用现状、土地利用效益等各功能团对生态环境效应系统均产生较强的胁迫作用,作用程度随时间变化而不断增大。同时,生态环境系统中对城市土地利用虽然也有较强的约束力,但强度逐渐降低,各功能团中表现出资源消耗程度>环境治理力度>环境负荷水平>生态环境现状的作用强度特征。

通过构建长三角地区城市土地利用与生态环境效应评价体系,探讨其耦合发展情况与交互作用演进机制,有利于明确城市土地利用与生态环境保护基本情况。但本文仅停留在较为粗浅的层面,选取的城市土地利用与生态环境效应的评估指标数据较少,评估结果与内容分析存在一定偏差,还需从居民生态感知角度深入探究生态环境系统对城市土地利用的影响。城市土地利用对生态环境质量的影响仅从整体趋势进行了评价,未能细化到更为具体的方面,一些典型的环境质量指标如空气质量、水质、生物多样性、土壤侵蚀等指标无法获取,给研究的顺利实施带来较大困难,并影响到生态环境质量的评价结果。因此,后续研究中需提高数据的精确性,拓宽数据的收集范围,考虑城市扩张引起的更为具体的生态环境变化,如对耕地的占用、生物多样性、地表径流量等的影响。同时,鉴于城市土地利用的动态性和复杂性以及不同城市自身的规律性,应从多个不同的角度剖析土地利用产生的生态环境效应与交互作用机制。

### 参考文献(References)

- [1] 刘浩, 张毅, 郑文升. 城市土地集约利用与区域城市化的时空耦合协调发展评价: 以环渤海地区城市为例 [J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1805-1817. [Liu Hao, Zhang Yi, Zheng Wensheng. Evaluation on spatio-temporal development and interaction of intensive urban land use and urbanization: Case studies of the cities in the Bohai Rim Region. Geographical Research, 2011, 30(10): 1805-1817.]
- [2] Byomkesh T, Nakagoshi N, Dewan A M. Urbanization and green space dynamics in Greater Dhaka, Bangladesh [J]. Landscape & Ecological Engineering, 2012, 8(1): 45-58.
- [3] 闫梅, 黄金川. 国内外城市空间扩展研究评析 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(7): 1039-1050. [Yan Mei, Huang Jin-

- chuan. Review on the research of urban spatial expansion. *Progress in Geography*, 2013, 32(7): 1039-1050. ]
- [4] 孙平军, 修春亮. 中国城市空间扩展研究进展 [J]. 地域研究与开发, 2014, 33(4): 46-52. [Sun Pingjun, Xiu Chunliang. Progress in research on urban spatial expansion of China. *Areal Research and Development*, 2014, 33(4): 46-52. ]
- [5] 杨清可, 段学军, 金志丰, 等. 南通市建设用地扩张情景模拟与景观生态效应 [J]. 地理科学, 2017, 37(4): 528-536. [Yang Qingke, Duan Xuejun, Jin Zhifeng, et al. Spatial scenario simulation and landscape ecological effect based on construction land expansion of Nantong City. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(4): 528-536. ]
- [6] Ferdous N, Bhat C R. A spatial panel ordered-response model with application to the analysis of urban land-use development intensity patterns [J]. *Journal of Geographical Systems*, 2013, 15(1): 1-29.
- [7] 周敏, 匡兵, 陶雪飞. 空间收敛视角下中国城市土地开发强度演变特征 [J]. 经济地理, 2018, 38(11): 98-103, 122. [Zhou Min, Kuang Bing, Tao Xuefei. Evolution characteristics of urban land development intensity in China from the perspective of spatial convergence. *Economic Geography*, 2018, 38(11): 98-103, 122. ]
- [8] Di X H, Hou X Y, Wang Y P, et al. Spatial-temporal characteristics of land use intensity of coastal zone in China during 2000-2010 [J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(1): 51-61.
- [9] 阿依吐尔逊·沙木西, 刘新平, 祖丽菲娅·买买提, 等. 西部绿洲城市土地利用转型的生态环境效应: 以乌鲁木齐市为例 [J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 149-159. [Aytursun Xamxi, Liu Xinping, Zulpiya Mamat, et al. Eco-environmental effects of land use conversion in oasis city in western China: A case study of Urumqi. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 149-159. ]
- [10] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析 [J]. 地理学报, 2005, 60(2): 237-247. [Liu Yaobin, Li Rendong, Song Xuefeng. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 237-247. ]
- [11] 崔佳, 臧淑英. 哈大齐工业走廊土地利用变化的生态环境效应 [J]. 地理研究, 2013, 32(5): 848-856. [Cui Jia, Zang Shuying. Regional disparities of land use changes and their eco-environmental effects in Harbin-Daqing-Qiqihar Industrial Corridor. *Geographical Research*, 2013, 32(5): 848-856. ]
- [12] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架 [J]. 地理学报, 2019, 74(8): 1489-1507. [Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Li Yonghong. The coupled human and natural cube: A conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1489-1507. ]
- [13] 赵丹阳, 佟连军, 仇方道, 等. 松花江流域城市用地扩张的生态环境效应 [J]. 地理研究, 2017, 36(1): 74-84. [Zhao Danyang, Tong Lianjun, Qiu Fangdao, et al. Eco-environment effect of urban expansion in Songhua River Basin. *Geographical Research*, 2017, 36(1): 74-84. ]
- [14] 李广娣, 冯长春, 曹敏政. 基于土地生态敏感性评价的城市空间增长策略研究: 以铜陵市为例 [J]. 城市发展研究, 2013, 20(11): 69-74. [Li Guangdi, Feng Changchun, Cao Minzheng. Study of urban spatial growth strategy based on ecological sensitivity assessment: A case study of Tongling. *Urban Development Studies*, 2013, 20(11): 69-74. ]
- [15] Alberti M, Marzluff J M. Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions [J]. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 241-265.
- [16] Alberti M, Booth D, Hill K, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2007, 80(4): 345-361.
- [17] Liu Y B, Dai L, Xiong H H. Simulation of urban expansion patterns by integrating auto-logistic regression, Markov chain and cellular automata models [J]. *Journal of Environmental Planning & Management*, 2015, 58(6): 1113-1136.
- [18] Liu Y J, Wang Y. Study on resource-environment response to the rapid urban expansion of China [J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 2549-2553.
- [19] 刘洪超, 吕军, 王铭, 等. 拉林河流域土地利用变化及其生态环境效应分析 [J]. 中国水土保持, 2019(6): 38-41, 69. [Liu Hongchao, Lv Jun, Wang Ming, et al. Land use changes and its effects on eco-environment in Lalin River Basin. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(6): 38-41, 69. ]
- [20] Lin J, Li X. Conflict resolution in the zoning of eco-protected areas in fast-growing regions based on game theory [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170(4): 177-185.
- [21] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y. Forty years of urban expansion in Beijing: What is the relative importance of



- physical socioeconomic, and neighborhood factors? [J]. *Applied Geography*, 2013, 38(1): 1-10.
- [22] Yang Y Y, Shi Z T, Xu C D, et al. RS-GIS based landscape pattern change and its effect on urban thermal environment in main urban area of Kunming, China [C]// IEEE. The 2nd International Conference on Information Science and Engineering. Hangzhou, China: 2010. doi: 10.1109/ICISE.2010.5691619.
- [23] 梁流涛, 雍雅君, 袁晨光. 城市土地绿色利用效率测度及其空间分异特征: 基于284个地级以上城市的实证研究 [J]. *中国土地科学*, 2019, 33(6): 80-87. [Liang Liutao, Yong Yajun, Yuan Chenguang. Measurement of urban land green use efficiency and its spatial differentiation characteristics: An empirical study based on 284 cities. *China Land Science*, 2019, 33(6): 80-87. ]
- [24] Tehrany M S, Pradhan B, Jebur M N. Remote sensing data reveals eco-environmental changes in urban areas of Klang Valley, Malaysia: Contribution from object based analysis [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2013, 41(4): 981-991.
- [25] 方创琳, 蒯雪芹. 武汉城市群空间扩展的生态状况诊断 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(10): 1211-1218. [Fang Chuanglin, Lin Xueqin. Ecological conditions diagnostic of spatial expansion in Wuhan urban agglomeration. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(10): 1211-1218. ]
- [26] 崔峰. 城市边缘区土地利用变化及其生态环境响应: 以南京市江宁区为例 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [Cui Feng. Research on land use change and the ecological environment response in the urban fringe: Taking Jiangning area as an example. Nanjing, China: Nanjing Agricultural University, 2013. ]
- [27] 宋永鹏, 张宇, 元媛, 等. 中原城市群核心区城市用地扩张的生态环境效应 [J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(1): 13-25. [Song Yongpeng, Zhang Yu, Yuan Yuan, et al. The eco-environmental effect of urban land expansion in the core region of central plains urban agglomeration. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2019, 49(1): 13-25. ]
- [28] 田俊峰, 王彬燕, 王士君. 东北三省城市土地利用效益评价及耦合协调关系研究 [J]. *地理科学*, 2019, 39(2): 305-315. [Tian Junfeng, Wang Binyan, Wang Shijun. Urban land use efficiency and its coupling relationship in the three provinces of Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(2): 305-315. ]
- [29] 张琳琳. 转型期中国城市蔓延的多尺度测度、内在机理与管控研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018. [Zhang Linlin. Research on the urban sprawl in transitional china: Multi-scale measurement, mechanism, and remedies. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2018. ]
- [30] 刘耀彬, 李仁东, 张守忠. 城市化与生态环境协调标准及其评价模型研究 [J]. *中国软科学*, 2005(5): 140-148. [Liu Yaobin, Li Rendong, Zhang Shouzhong. Study on the coordinative criteria and coordination degree model between regional urbanization and eco-environment. *China Soft Science*, 2005(5): 140-148. ]

## Mechanism of interaction between urban land expansion and ecological environment effects in the Yangtze River Delta

YANG Qingke<sup>1</sup>, DUAN Xuejun<sup>2,3\*</sup>, WANG Lei<sup>2,3</sup>, WANG Yazhu<sup>2,3</sup>

(1. School of Public Administration, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing 210023, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

3. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, CAS, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Taking the Yangtze River Delta as the research object, this study established the correlation model and coupling degree model for evaluating the mechanism of interaction between urban land expansion and ecological environment effects by using grey correlation analysis method. It explored the pattern of temporal and spatial variation and coupling degree characteristics of urban land expansion and ecological environment effects and change, and analyzed the interactions between the two systems. The results show that: 1) The index of urban land expansion in the Yangtze River Delta has been increasing, and the socioeconomic development and land use development have played a significant positive role. Socioeconomic development imposes a demand for greater urban production and living space and higher environmental quality. The increase of construction land area, the high-intensity expansion and the decrease of population density are all important reasons for the increase of urban land expansion index. 2) The overall performance of the regional ecological environment quality is stable, and the ecological environment effect is reflected in its spatial differentiation, with obvious characteristics of spatial and temporal change. The ecological environment quality of the cities in Zhejiang Province is significantly higher than that of Shanghai Municipality and Jiangsu Province, which is closely related to the regional environmental carrying capacity, the construction of pollution control facilities, and the propagation of ecological protection concepts. 3) Most cities have low coupling degree between urban land expansion and ecological environment effect, and the relationship between the two systems is in a state of imbalance. In the process of urbanization, land expansion tends to be low-density and decentralized, which strongly threatens the ecological security and environmental quality and lead to the increase of spatial disparity between urban land development and ecological environment protection. 4) There is a strong interaction between the elements of urban land expansion system and ecological environment system in the Yangtze River Delta, and the forces of each element are slightly different. The stressing effect of urban land expansion on ecological environment is gradually increasing, while the restraining effect of ecological environment on urban land expansion is decreasing.

**Keywords:** urban land expansion; ecological environment effect; mechanism of interaction; Yangtze River Delta