

中国城市群城市用地扩张时空动态特征

欧阳晓^{1,2}, 朱翔¹

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081;
2. 国土资源评价与利用湖南省重点实验室, 长沙 410007)

摘要: 认识城市群城市用地扩张特征、扩张质量及景观生态效应等综合信息将有助于城市群空间高质量发展规划与决策。选取10个不同发育等级的城市群作为研究对象,综合运用城市用地扩张强度指数、城市用地扩张强度差异指数、景观扩张指数、景观格局指数,分析1990—2015年期间城市群城市用地扩张时空特征及景观生态效应,并构建人口、经济与城市用地协同发展指数,据此分析城市用地扩张中“人—地”关系协同程度。结果表明:①1990—2015年,各个城市群城市用地面积持续增加,建成区的范围不断扩大,扩张强度呈现“上升—下降”的趋势;在2010年之前成熟型城市群的扩张强度最高,2010年之后培育型城市群成为扩张强度最高的类型。②城市群城市用地扩张总体上呈现不均衡布局的趋势,高速扩张区域主要分布在沿海地区。从全国视角来看,东部高于中、西、东北部,整体城市群快速扩张的中心由东向西移动。③城市群城市用地空间扩张模式表现出边缘式和飞地式两种空间扩张模式并存,不同发育等级之间具有明显差异性,成熟型城市群的空间结构较为稳定,其他两种类型的城市群空间结构初具雏形或尚未形成。④城市群城市用地扩张“吞没”了郊区和农村地区,破碎化程度、形状的复杂程度较高,景观格局表现出不稳定。⑤城市群“人口—土地”协同程度逐步增强,“经济—土地”协同程度整体较高,整体上表现出城市用地扩张质量有所提升。新时期城市群城市用地应严格控制扩张规模,加快中小城市的发展,促进城市群城市用地扩张均衡发展,为城市群国土空间高质量发展提供重要参考。

关键词: 城市群;城市用地扩张;人地协同;景观生态效应

DOI: 10.11821/dlxb202003010

1 引言

城市用地扩张成为全世界城市的发展主题,经济和人口的快速增长导致城市用地前所未有的扩张规模^[1-2]。城市用地扩张的负面影响包括经济方面(如:农村衰落、房地产泡沫等)^[3-4],社会方面(如:交通拥堵、慢性疾病和贫富差距等)^[5-7],以及生态环境方面(如:生物多样性减少、温室气体排放和空气污染等)^[8-9]。城市群作为城市用地扩张最为活跃的区域,大量农村人口迁入城市群以及生态用地被城市用地大规模侵占,致使区域面临严重的生态环境问题^[10-11],对城市群可持续发展带来挑战。因此,量化城市群城

收稿日期: 2019-04-30; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA040); 国土资源评价与利用湖南省重点实验室开放课题(SYS-ZX-201902); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B296) [Foundation: Major Program of National Social Science Foundation of China, No.18ZDA040; The Open Topic of Hunan Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Utilization, No.SYS-ZX-201902; Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate, No.CX2018B296]

作者简介: 欧阳晓(1990-), 男, 博士生, 研究方向为城市化过程及生态环境效应。E-mail: xiao.ouyang@foxmail.com

通讯作者: 朱翔(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域经济与区域规划。E-mail: zhuxiang882000@aliyun.com

市用地扩张的时空动态特征是认识和评价城市群发展进程的必要条件,同时为优化城市群空间高质量发展规划与决策提供理论依据。

城市群是高度发达的空间一体化的城市形态,是国家工业化和城镇化进入高级阶段的产物^[12],国内外关于城市用地扩张的研究逐渐升温^[13]。其中,国外关于城市群城市用地扩张研究以美国、英国为代表的西方国家和以印度为代表的南亚国家为主^[14-18],不同发展阶段的国家呈现不同的城市用地空间扩张模式,西方国家的城市群在市场经济作用下表现出“先集聚后扩散”的扩张模式;南亚等国家的城市群在经济全球化的影响下表现出“先扩散后集聚”的扩张模式。国内关于京津冀、长三角、珠三角、武汉等单个城市群的城市用地扩张研究形成了丰富的成果^[19-29],并有研究通过对比同一地区或者同一发育等级城市群的城市用地扩张特征,发现城市群之间扩张特征存在共性也具有差异^[13, 30]。但目前相关研究缺乏长时间段全国范围内不同发育等级的城市群城市用地扩张研究。因此,研判全国范围内不同发育等级的城市群城市用地扩张特征对深化认识城市群空间结构及发育程度至关重要。

城市群在参与全球竞争和国际分工中有着重要作用,是中国区域发展中最具活力和潜力的地区,但其存在城市用地扩张过快、空间范围扩容过度以及空间结构不合理等问题^[31]。因此,基于长时间段全国范围内不同发育等级的城市群城市用地扩张的横向和纵向对比研究,尤其是中国正处于经济发展模式由高速度向高质量转变,新型城镇化、“一带一部”“贸易摩擦”等多维城市群发展背景融合阶段^[32],探索中国城市群城市用地扩张的规律,对深刻理解城市群扩张过程及发展规律具有重要意义。然而,从全国范围来研究城市群城市用地空间扩张还存在一定的难度^[13]。①采用常规方法获取全国尺度城市用地扩张数据存在一定的难度。②虽然研究城市扩张的方法较多,但用于大尺度城市扩张研究的方法还相对不足。随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)的迅速发展,学者们将这些方法运用到城市扩张特征研究^[33-34]。为此,本文基于现有城市用地提取的技术,运用Google Earth Engine(GEE)地理云平台获取城市群长时间段和跨区域的城市用地数据,以突破研究全国范围内城市群城市用地数据的限制。

中国作为世界上最大的发展中国家,自1978年改革开放以来,经历了快速工业化和城镇化,形成了几个世界级的城市群,以及一系列国家级和区域性的城市群。其中,城市用地面积的增加和耕地面积的减少,造成了严重的生态退化、环境污染等“城市群病”^[35-39]。如何科学描述城市群城市用地时空扩张特征成为评价城市群国土空间利用质量的核心问题,是城市群能否实现高质量发展和高效率扩张的关键。如何通过纵向和横向对比认识不同发育等级的城市群城市用地扩张特征、扩张质量及其景观生态效应,对城市群健康发育和可持续发展具有重要的参考价值。

鉴于此,本文利用Landsat TM/ETM遥感数据,运用GIS和景观生态学相结合的方法,对1990—2015年期间中国不同发育等级的城市群城市用地扩张的时空特征进行了纵向和横向比较分析,并基于城市用地扩张视角对“人口—土地”协同程度、“经济—土地”协同程度以及景观生态效应进行评价,从而揭示城市群城市用地扩张存在的问题,以期从宏观层面增加对中国城市群城市用地变化规律的认知。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

2011年,《中国城市群发展报告》提出了量化城市群形成和发展的七个标准,具体用

9个指标来量化,包括地级市数量、人口超过100万的特大城市数量、人口规模、城市化水平、人均GDP等^[40],将城市群的空间结构体系划定为“15+8”的城市群格局^[31],2014年按照国家主体功能区规划编制和实施要求进一步修订为“4+6+9”的城市群格局^[41]。根据2018年城市群格局^[42],本文从东、中、西部及东北地区选取在城市用地扩张方面具有典型性和代表性的10个城市群作为研究对象(图1)。

城市群选取原因概述如下:京津冀城市群是中国的经济核心和政治中心,是国家竞争力的体现,其部分城市的国土开发强度超过了30%的国际警戒线^[19]。长江三角洲城市群(简称长三角城市群)是“一带一路”与“长江经济带”的重要交汇地带,是中国最具经济活力的地区之一,其城市用地扩张速度快、规模大,导致生态用地减少、空气污染等生态环境问题日益突出^[20]。长江中游城市群是促进中部地区崛起的核心区域,其拥有较为丰富的土地资源,但土地生态环境脆弱,城市用地扩张进程中水土流失比较严重^[21]。成渝城市群位于四川盆地与平原地区,是促进西部大开发的重要平台,也是推动长江经济带和“一带一路”倡议的强力支撑,其城市用地快速扩张与耕地资源相对短缺的矛盾日益突出^[22]。珠江三角洲城市群(简称珠三角城市群),是中国市场化程度最高的地区之一,其国土开发强度远高于同期的全国平均水平,对资源环境造成巨大压力^[23]。辽中南城市群濒临渤海,是东北地区经济发展的龙头,是振兴东北老工业的主力军,其重工业为主导的产业结构导致城市用地负荷大^[24]。哈长城市群,是东北地区典型的老工业基地,是中蒙俄经济走廊的核心区域,其城市用地扩张存在粗放低效的问题^[25]。中原城市群是促进中部崛起的重要载体,是促进东中西部地区协调发展的重要支点,其城市用地扩张呈现无序蔓延的状态,耕地大规模减少,生态环境日益恶化等问题异常突出^[26-27]。天山北坡城市群地处生态环境脆弱的绿洲地区,是新疆城市化和经济发展最具活力的核心区,是丝绸之路经济带核心区建设的唯一城市群,其城市用地扩张受水资源的影响,具有与其他城市群不同的扩张模式^[28]。北部湾城市群与东盟海陆相邻,是面向东盟国家对外开放的重要门户,其拥有较大的国土开发利用潜力,生态环境承载力较大^[29]。

2.2 数据来源及描述

采集1990年、1995年、2000年、2005年、2010年和2015年6个年份的夏季Landsat TM/ETM遥感影像(夏季影像能够有效地区分城市用地和农业用地),在GEE地理云平台上^[43]对图像进行了一系列的调整和校正,包括波段组成、大地基准校正和地面控制点校准。采用人机交互解译方法根据光谱反射率、背景、阴影、地形和专家知识确定土地利用类型。参照土地利用现状分类研究结果^[44],将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个大类。其中,本文将建设用地中的大、中、小城市建设用地和建制镇建设用地等不透水地表所覆盖的开发用地统称为城市用地。最终提取

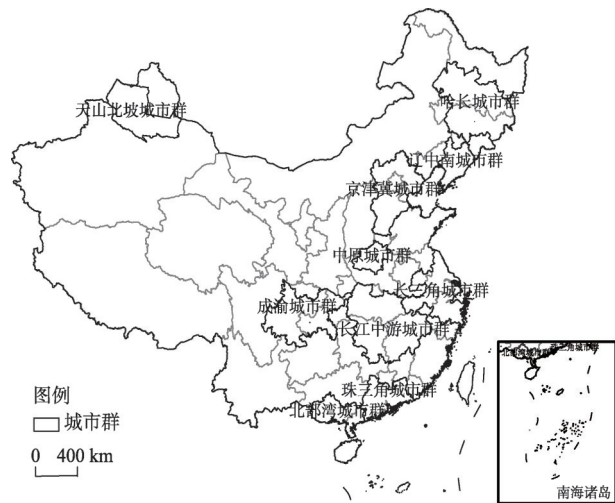


图1 研究对象空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of study objects

的城市用地面积与《中国城市统计年鉴》^[45]官方公布数据对比, 总体精度达到0.89~0.94, 符合本次研究精度的要求。

各个城市群的人口密度、经济密度的数据来源于《中国城市统计年鉴》^[45]和《中国统计年鉴》^[46], 综合考虑夜间灯光数据、土地利用类型和其他遥感信息后, 将人口密度和经济密度数据通过插值降尺度到公里网格上, 便于空间显示城市用地覆盖区域的人口、经济变化情况。

2.3 城市用地扩张强度和差异

2.3.1 城市用地扩张强度指数 城市用地扩张强度指数 (urban expansion intensity index, UEI) 是指同一城市群城市用地不同时间段的扩张强度, 反映同一城市群城市用地不同时间段扩张情况^[47-48], 可用于研究城市群的城市用地扩张强度, 对比同一城市群不同时期的城市用地扩张特征, 公式为^[47]:

$$UEI_n = \frac{A_n^{t_2} - A_n^{t_1}}{A_n^{t_1} \times \Delta t} \quad (1)$$

式中: UEI_n 代表第 n 个城市群的城市用地扩张强度指数; $A_n^{t_1}$ 、 $A_n^{t_2}$ 分别代表 t_1 、 t_2 时间段第 n 个城市群的城市用地面积; Δt 代表 t_1 到 t_2 的间隔年份。

2.3.2 城市用地扩张强度差异指数 城市用地扩张强度差异指数 (urban expansion intensity differentiation index, UEDI) 是某一城市群城市用地扩张变化强度与所有城市群的城市用地扩张变化强度的比值, 反映不同城市群城市用地扩张强度差异^[47-48]。该指数可用于研究城市群的城市用地扩张的横向对比, 排除城市群规模大小的影响, 比较同一时期不同城市群的城市用地扩张强度差异, 公式为^[47]:

$$UEDI_n = \frac{|A_n^{t_2} - A_n^{t_1}| \times A_n^{t_1}}{|A^{t_2} - A^{t_1}| \times A_n^{t_1}} \quad (2)$$

式中: $UEDI_n$ 代表第 n 个城市群的城市用地扩张强度差异指数; $A_n^{t_1}$ 、 $A_n^{t_2}$ 分别代表 t_1 、 t_2 时间段第 n 个城市群的城市用地面积; A^{t_1} 、 A^{t_2} 分别代表 t_1 、 t_2 时间段所有城市群的城市用地面积。

2.4 景观扩张指数

景观扩张指数 (landscape expansion index, LEI) 通过确定现有城市用地与新增城市用地的空间位置关系来识别城市用地的空间扩张模式^[49-50]。相对于反映时间序列的城市用地扩张特征的方法, LEI方法提供了更直观的空间表现方式, 可以表征城市用地空间扩张的过程。根据LEI结果可以将某一时期新增城市用地空间扩张模式划分为三类: 填充式、边缘式和飞地式^[38]。其中, 填充式是指通过填充现有城市用地内的空隙而形成的新增城市用地; 边缘式是指新增城市用地沿现有城市用地边缘向外延伸的城市用地空间扩张模式; 飞地式是指独立现有城市用地而新增的城市用地。公式为^[50]:

$$LEI = \frac{L_{com}}{P_{new}} \quad (3)$$

式中: L_{com} 为新增城市用地与现有城市用地的共同边界长度; P_{new} 为新增城市用地的周长; 飞地式 $LEI=0$, 边缘式 $0 < LEI \leq 0.5$, 填充式 $0.5 < LEI \leq 1$ 。

2.5 景观格局指数

由于城市用地扩张具有高度不可逆转的特点, 其面积的不断加大会导致景观格局发生相应的变化。景观格局指数包含数量、大小和形状等不同景观生态学意义^[51-52]。本文选取其中5个景观格局指数综合表征城市用地扩张的景观生态效应^[52] (表1), 包括: 斑块

表1 景观格局指数与城市用地扩张之间的关系

Tab. 1 Relationship between landscape pattern indexes and urban land expansion

景观格局指数	单位	公式	生态学意义	与城市用地扩张的关系
斑块数量(NP)	个	$NP = \sum_{i=1}^n N_i$	斑块的数量	衡量城市用地离散程度。随着城市用地快速发展, 斑块数呈上升趋势, 随着城市用地的集聚, 斑块数可能会下降。
景观类型比例(PLAND)	%	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100\%$	斑块类型所占景观面积比例	反映城市用地的规模。值越大, 城市用地扩张强度越大。
最大斑块指数(LPI)	%	$LPI = \frac{\text{Max}(a_1, a_2, \dots, a_n)}{A} \times 100\%$	最大斑块在整个景观中所占比例	反映城市用地斑块的优劣势。值越大, 城市用地扩张越集聚。
景观形状指数(LSI)	-	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	斑块形状复杂程度	反映城市用地斑块周边的复杂性。值越大, 景观的形状越不规则。
斑块密度(PD)	个/hm ²	$PD = \frac{NP}{A}$	单位面积斑块数量	反映城市用地斑块的数量。值越大, 城市用地破碎程度越高。

注: A 为景观总面积; a_{ij} 为斑块 ij 的面积; N_i 为 i 类斑块的数目; A_i 为 i 类斑块的面积; E 为斑块总周长。

数量 (number of patches, NP)、景观类型比例 (percentage of landscape, PLAND)、最大斑块指数 (largest patch index, LPI)、景观形状指数 (landscape shape index, LSI)、斑块密度 (patch density, PD) 等一系列指数, 运用Fragstats 4.2软件计算得到以上指数。

2.6 城市用地与人口、GDP协同程度分析

从城市用地扩张视角来看, 高质量的城市用地扩张是经济、人口与城市用地扩张协同发展的过程^[53-55], 并且引导人口和经济有机疏散。因此, 本文构建了“人口—土地”协同发展系数和经济弹性系数, 用于分析城市用地扩张质量。

2.6.1 “人口—土地”协同发展系数 基于新增城市用地和原有城市用地的人口密度相对变化分析城市用地扩张的“人口—土地”协同程度, 公式为^[54]:

$$Ratio_{POP} = \frac{POP_{new}}{POP_{original}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $Ratio_{POP}$ 为新增城市用地与原有城市用地人口密度的比值; POP_{new} 为新增城市用地的人口密度; $POP_{original}$ 为原有城市用地的人口密度。

2.6.2 经济弹性系数 基于城市用地扩张与经济增长相对变化分析城市用地扩张的“经济—土地”协同程度, 公式为^[55]:

$$Land_{GDP} = \frac{\sqrt[N]{GDP_b/GDP_a} - 1}{\sqrt[N]{Land_b/Land_a} - 1} \quad (5)$$

式中: $Land_{GDP}$ 为城市用地与GDP增长弹性系数; GDP_a 、 GDP_b 分别为基准年、目标年城市群GDP; $Land_a$ 、 $Land_b$ 分别为基准年、目标年城市群城市用地面积; N 为研究间隔年份。其中, 各个年份的GDP数据为城市用地范围内GDP的平均值, 且处理成1990年可比价格。

3 城市群城市用地扩张的时空格局与规模等级模式差异研究

3.1 城市用地扩张强度时空格局分析

对1990—1995年、1995—2000年、2000—2005年、2005—2010年以及2010—2015

年5个时期不同发育等级的城市群城市用地扩张特征进行量化分析,从中探索中国城市群城市用地扩张的时空规律及分异特征。

3.1.1 城市用地扩张强度时间演化特征 城市用地扩张强度整体上先增加后减少,呈现出阶段性特征(表2)。1990—2015年,各个城市群城市用地面积持续增加,建成区的范围持续扩张,但不同时间段城市群之间扩张强度存在差异。1990—1995年期间,珠三角城市群的城市用地扩张强度指数最高,UEI指数为1.54%;长三角、成渝城市群UEI指数次之,依次为1.12%、1.11%;京津冀、天山北坡、辽中南、中原城市群、北部湾、哈长以及长江中游城市群UEI指数均处于1.00%以下,依次为0.79%、0.60%、0.46%、0.31%、0.15%、0.14%、0.13%。1995—2000年期间,成渝城市群的城市用地扩张强度指数最高,UEI指数为3.00%;珠三角、长三角城市群UEI指数次之,依次为2.08%和1.40%;京津冀、辽中南、长江中游、天山北坡、中原、哈长以及北部湾城市群UEI指数均处于1.00%以下,依次为0.91%、0.80%、0.77%、0.49%、0.46%、0.22%、0.18%。2000—2005年期间,长三角城市群的城市用地扩张强度指数最高,UEI指数为4.54%;成渝、珠三角、辽中南城市群UEI指数次之,依次为4.07%、3.38%、1.37%;京津冀、长江中游、中原、天山北坡、北部湾以及哈长城市群UEI指数均处于1.00%以下,依次为0.95%、0.79%、0.77%、0.77%、0.29%、0.15%。2005—2010年期间,长三角城市群的城市用地扩张强度指数最高,UEI指数为2.33%;成渝、中原、珠三角城市群UEI指数次之,依次为2.22%、1.67%、1.43%;长江中游、京津冀、辽中南、北部湾、天山北坡以及哈长城市群UEI指数均处于1.00%以下,依次为0.96%、0.57%、0.54%、0.47%、0.36%、0.23%。2010—2015年期间,天山北坡城市群的城市用地扩张强度指数最高,UEI指数为2.37%;长三角、中原、成渝、珠三角城市群UEI指数次之,依次为2.19%、1.61%、1.54%、1.29%;哈长、长江中游、京津冀、北部湾以及辽中南城市群UEI指数均处于1.00%以下,依次为0.64%、0.60%、0.55%、0.49%、0.38%。

表2 城市群城市用地扩张强度指数(%)

Tab. 2 The intensity index of urban land expansion in urban agglomerations of China (%)

城市群	1990—1995年	1995—2000年	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	1990—2015年
京津冀城市群	0.79	0.91	0.95	0.57	0.55	0.81
长三角城市群	1.12	1.40	4.54	2.33	2.19	2.87
珠三角城市群	1.54	2.08	3.38	1.43	1.29	2.04
成渝城市群	1.11	3.00	4.07	2.22	1.54	2.99
中原城市群	0.31	0.46	0.77	1.67	1.61	1.05
长江中游城市	0.13	0.77	0.79	0.96	0.60	0.69
辽中南城市群	0.46	0.80	1.37	0.54	0.38	0.76
北部湾城市群	0.15	0.18	0.29	0.47	0.49	0.32
天山北坡城市群	0.60	0.49	0.77	0.36	2.37	0.99
哈长城市群	0.14	0.22	0.15	0.23	0.64	0.28

3.1.2 城市用地扩张强度空间分异特征 基于城市群尺度分别计算各个城市群的城市用地扩张强度差异指数,运用自然断点分级法将城市用地扩张强度划分为缓慢扩张、低速扩张、中速扩张、快速扩张以及高速扩张等5大类型^[47-48](图2)。图2可以看出,城市群之间城市用地扩张存在差异,总体上呈现不均衡布局的趋势,高速扩张区域主要分布在沿海地区。从全国视角来看,东部高于中、西、东北部,整体城市群快速扩张的中心由东向西移动。1990—1995年期间,京津冀、长三角、珠三角以及成渝城市群的城市用地扩

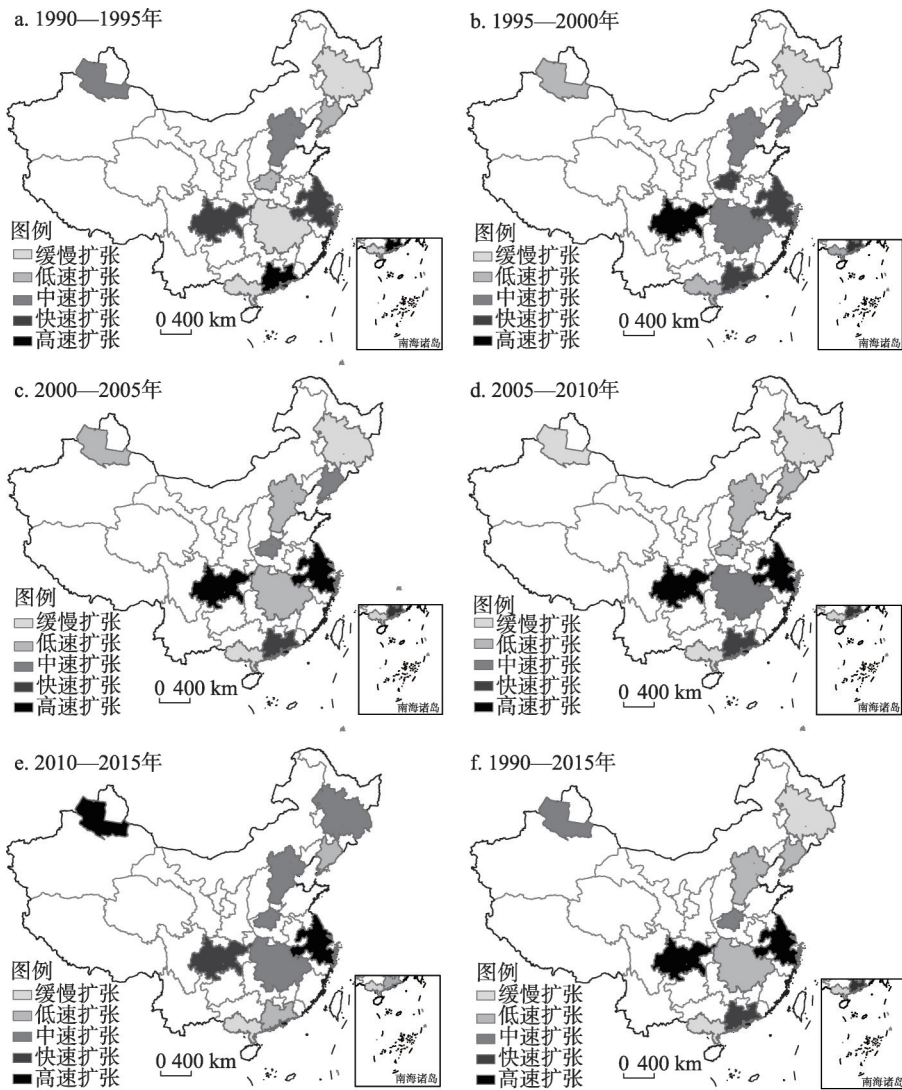


图2 城市群城市用地扩张强度差异指数分异

Fig. 2 The spatial characteristics of urban land expansion differentiation index

张速度高于整个城市群的UEDI指数平均值1.00，尤其是珠三角城市群，UEDI指数达到2.48，城市用地由4471.09 km²增加到4816.14 km²；其他城市群的城市用地扩张速度低于整个城市群的UEDI指数平均值，UEDI指数介于0.20~0.94之间，其中辽中南城市群城市用地新增面积最为显著，由3653.60 km²增加到3737.23 km²。1995—2000年期间，长三角、珠三角、成渝以及中原城市群的城市用地扩张速度高于整个城市群的UEDI指数平均值1.10，尤其是成渝城市群，UEDI指数达到2.81，城市用地由2314.94 km²增加到2662.39 km²；其他城市群的城市用地扩张速度低于整个城市群的UEDI指数平均值，UEDI指数介于0.20~0.85之间，其中京津冀城市群城市用地新增面积最为显著，由12401.61 km²增加到12964.98 km²。2000—2005年期间，长三角、珠三角以及成渝城市群的城市用地扩张速度高于整个城市群的UEDI指数平均值0.97，尤其是长三角城市群，UEDI指数达到2.40，城市用地由11878.96 km²增加到14575.78 km²；其他城市群的城市

用地扩张速度低于整个城市群的UEDI指数平均值, UEDI指数介于0.08~0.85之间, 其中京津冀城市群城市用地新增面积最为显著, 由12964.98 km²增加到13583.94 km²。2005—2010年期间, 长三角、珠三角以及成渝城市群的城市用地扩张速度高于整个城市群的UEDI指数平均值0.97, 尤其是长三角城市群, UEDI指数达到2.23, 城市用地由14575.78 km²增加到16275.72 km²; 其他城市群的城市用地扩张速度低于整个城市群的UEDI指数平均值, UEDI指数介于0.22~0.76之间, 其中京津冀城市群城市用地新增面积最为显著, 由13583.94 km²增加到13959.60 km²。2010—2015年期间, 长三角、成渝以及北部湾城市群的城市用地扩张速度高于整个城市群的UEDI指数平均值0.96, 尤其北部湾城市群, UEDI指数达到2.41, 城市用地由3543.25 km²增加到3575.04 km²; 其他城市群的城市用地扩张速度低于整个城市群的UEDI指数平均值, UEDI指数介于0.18~0.85之间, 其中京津冀城市群城市用地新增面积最为显著, 由13583.94 km²增加到14360.00 km²。

3.2 城市用地空间扩张模式

根据景观扩张指数计算1990—2015年期间5个时期10个城市群3种空间扩张模式各自占比(图3)。图3可以看出, 城市群整体上表现出边缘式和飞地式空间扩张模式并存, 但不同发育等级的城市群在空间扩张模式上存在明显差异。

京津冀城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2005年期间, 城市用地空间扩张模式以飞地式扩张为主, 城市群经历了扩散过程, 出现了多处新城、新区等扩张增长点; 2005—2015年期间, 以边缘式扩张为主, 城市群经历了集聚过程, 城市用地扩张区域主要集中于北京、天津、石家庄等中心城区外围(图4a), 形成了紧凑的城市用地空间格局。珠三角城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2000年期间, 以边缘式扩张为主, 城市用地扩张区域主要集中在城市群核心区域的广州、深圳、佛山、东莞等区域(图4b); 2000—2005年期间, 飞地式占比迅速上升成为主导模式, 城市群受到经济全球化的影响, 乡镇工业向城市地区转移, 城市用地扩张有了更多的增长极, 如城市群外围区域的肇庆、江门、惠州等区域; 2005—2015年期间, 扩张模式平稳发展, 以边缘式和填充式扩张为主。长三角城市群与珠三角城市群城市用地空间扩张模式具有相同的阶段特征, 其中, 1990—2000年期间, 城市用地扩张区域主要集中在上海、南京和杭州等的城市群核心区域(图4c); 2000—2005年期间, 核心区域周边出现多个卫星城以及区位优势明显的新城、新区的建设, 使得飞地式占比快速增加; 2005—2015年期间, 现有城市用地产生邻近作用, 使得城市用地表现出边缘式和填充式扩张为主。成渝城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2005年期间, 重庆主城与成都主城之间产生相互作用力, 使得城市用地沿着两个核心城市之间连线进行布局, 以飞地式扩张为主, 城市用地扩张区域主要集中在成渝铁路沿线和川东北、川南城镇群等区域(图4d); 2005—2015年期间, 边缘式和填充式比重呈现逐年增加趋势, 表明成渝城市群扩张模式趋于平稳发展。中原城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2005年期间, 飞地式比重逐年增长, 并在2005—2010年期间替代边缘式成为主导模式, 城市用地扩张区域主要集中在郑州、洛阳、焦作、开封等区域(图4e); 2005—2015年期间边缘式和填充式比重迅速增加, 2010—2015年期间边缘式再次成为主导模式。长江中游城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2015年期间, 受到武汉、长株潭、环鄱阳湖城市群的辐射影响, 中小城市成为城市用地扩张的新增长点, 导致整个城市群以飞地式扩张为主, 城市用地扩张区域主要集中在京广铁路、沪昆铁路以及长江沿线等区域(图4f)。辽中南城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2000年期间, 飞地式占比出现下降, 边缘式占比快速增长, 并在1995—2000年期间替代飞地式成为主导模式, 城市群以沈阳为中心, 城市用地扩张区域集中于沈阳及其周边区

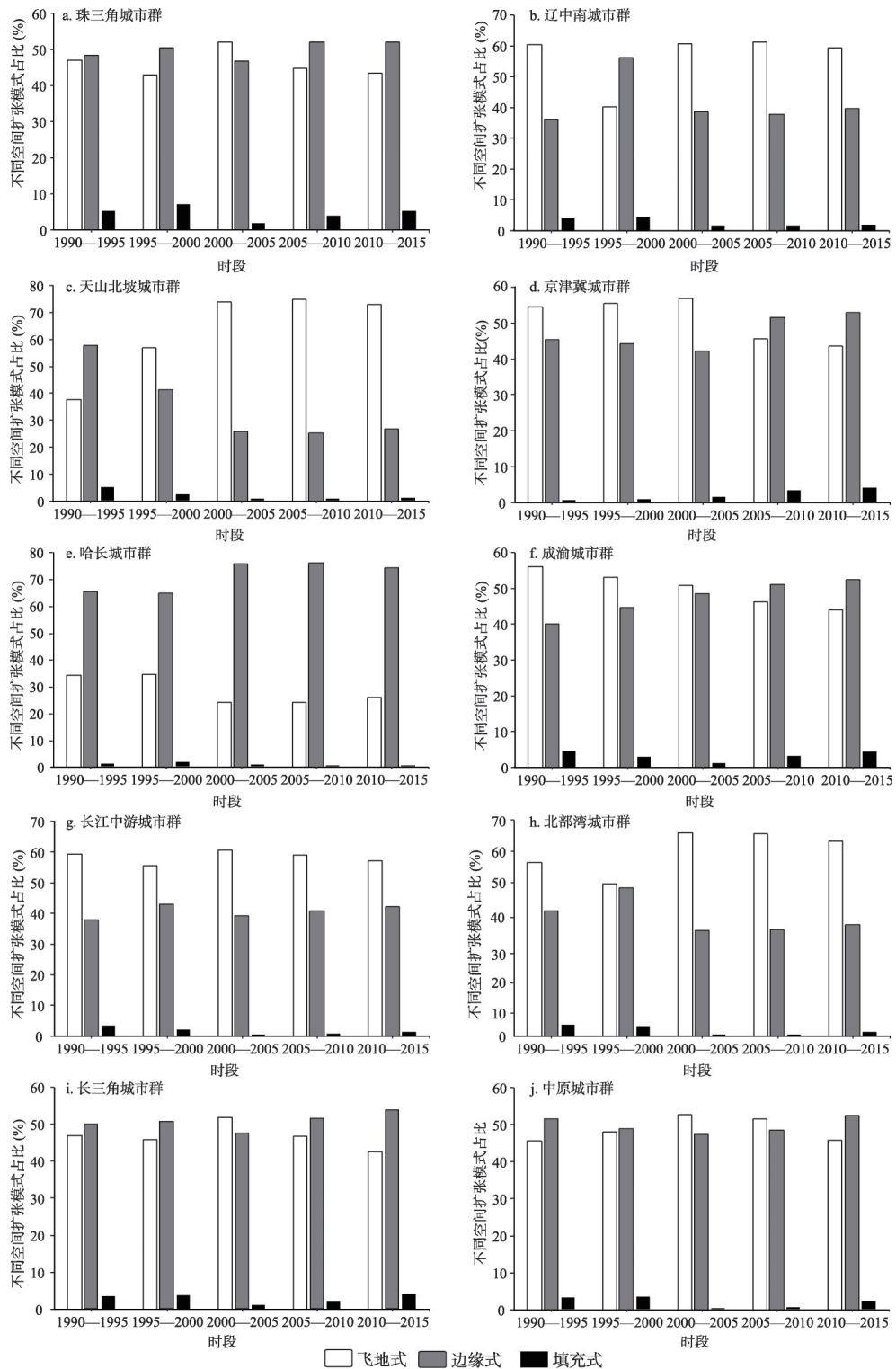


图3 城市群城市用地三种空间扩张模式占比

Fig. 3 The percentage of three urban land expansion types in urban agglomerations

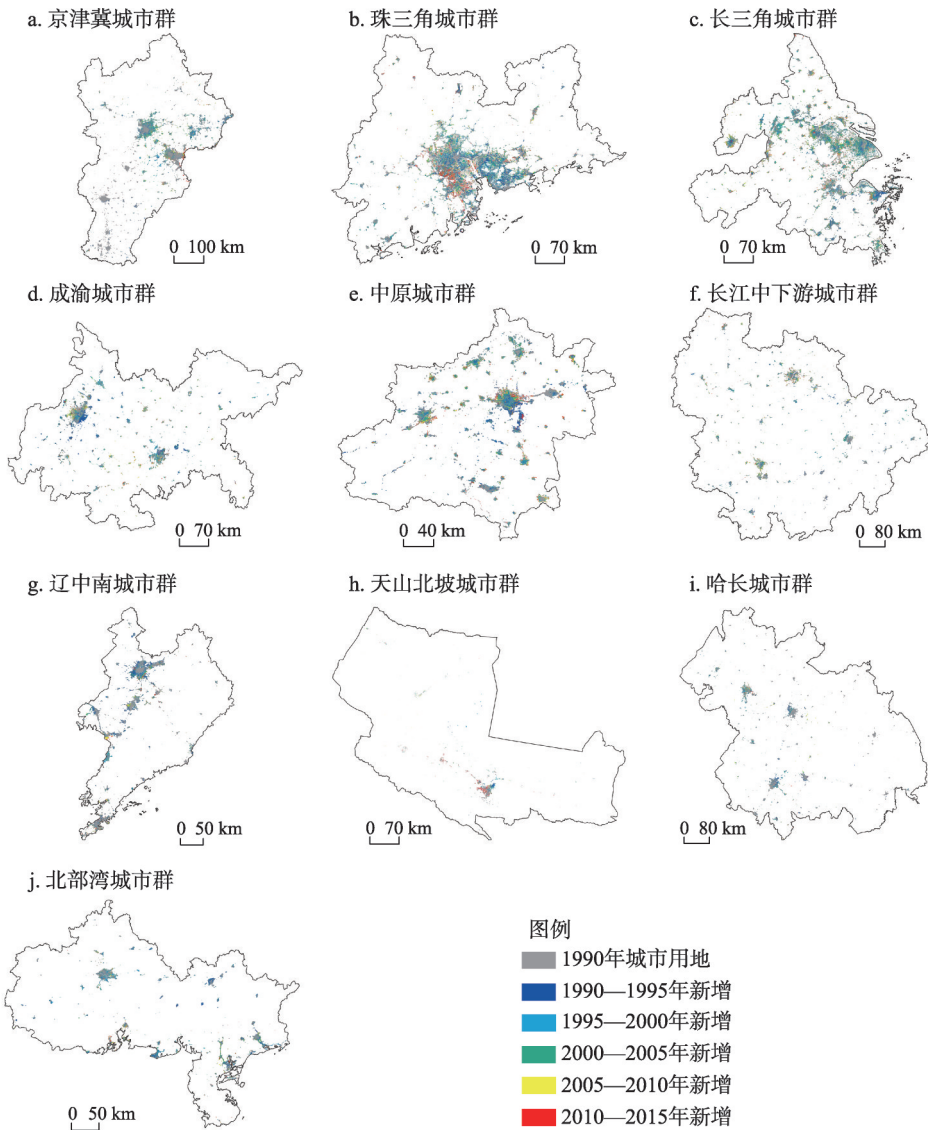


图4 城市群城市用地扩张过程

Fig. 4 Process of urban land expansion in urban agglomerations

域 (图4g); 2000—2015年期间, 飞地式占比迅速上升, 填充式占比也出现小幅度的增长, 城市群呈现出“双核”(沈阳、大连)特征, 城市用地扩张区域集中在双核之间的中小城市以及重点资源型城市, 呈现“多点”扩张的飞地模式。天山北坡城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2015年期间, 飞地式占比不断增长, 而边缘式和填充式占比不断下降。受水资源的制约, 城市用地扩张沿着河流或集水区进行零散布局, 整体呈现出与其他城市群不同的扩张模式 (图4h)。哈长城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2015年期间, 边缘式占比高于飞地式和填充式, 飞地式在城市用地扩张中一直处于次要地位。表明城市用地扩张以“核心—边缘”扩张模式为主, 没有形成明显的扩张增长点, 城市用地扩张区域集中在哈尔滨、长春两个核心城市, 其他区域扩张较慢 (图4i)。北部湾城市群城市用地空间扩张模式, 1990—2015年期间, 以飞地式为主导模式; 2005—

2015年期间,飞地式占比有所下降,边缘式和填充式逐渐增加,扩张区域主要分布在北海、玉林等沿海地区(图4j)。

3.3 城市用地扩张的发育等级模式差异分析

3.3.1 城市群发育等级分类 根据全国城镇体系规划(2016—2030年)^[56]以及叶裕民等关于城市群发育等级划分的研究成果^[57],从城市用地扩张视角出发将城市群划分为成熟型、成长型和培育型^[31, 40, 57-58],其各自特征如下:

成熟型城市用地规模较大,具有稳定的城市群空间结构,空间扩张模式以边缘式和填充式为主。本研究中的长三角、珠三角、京津冀以及成渝城市群属于成熟型。

成长型城市用地规模仅次于成熟型城市群,城市群空间结构初具雏形,呈现核心强周边弱的特征。本研究中的长江中游、辽中南以及中原城市群属于成长型。

培育型城市用地规模最小,尚未形成城市群空间结构,空间扩张模式以边缘式和飞地式为主。本研究中的哈长、北部湾以及天山北坡城市群属于培育型。

3.3.2 不同发育等级城市用地扩张特征 从城市用地扩张强度和空间扩张模式两个维度对不同发育等级的城市群城市用地扩张特征进行分析。

城市用地扩张强度方面,城市群之间的发育程度迥异导致不同城市群之间具有明显差异。成熟型城市群城市用地强度最高,UEI指数介于1.00%~2.99%,极大值出现在2000—2005年之间,2005—2015年期间扩张强度呈现减缓趋势;成长型城市群次之,UEI指数介于0.65%~1.00%,极大值出现在2005—2010年之间,2005—2015年期间扩张强度呈现减缓趋势;培育型城市群最低,UEI指数介于0.25%~0.65%,极大值出现在2010—2015年之间,扩张强度呈现上升趋势。主要是因为成熟型城市群城市发展基础好,经济规模大,具有推动人口集聚和经济增长的条件,同时,成熟型城市群具有较为完善的交通基础设施,更容易集聚各种发展要素,推动城市群的城市用地进行高强度的扩张。

城市用地空间扩张模式方面,成熟型城市群边缘式占比增长随时间的推移相对稳定,2005年后填充式占比急剧增加,飞地式占比增长的贡献迅速下降。成长型城市群以飞地式为主,2005年后边缘式和填充式逐步增加。培育型城市群飞地式快速增加,边缘式出现下降,填充式变化相对稳定。主要是因为成熟型城市群的空间结构比较稳定,核心城市的增长极效应明显,对周边区域的辐射作用增强,城市用地扩张主要以核心城市为中心向边缘地区进行圈层式扩张。成长型城市群和培育型城市群的空间结构初具雏形或尚未形成,核心城市尚未形成较强的辐射作用,对周边区域的引力不足,城市用地扩张主要集中在核心城市和具有交通优势的区域。

4 讨论

4.1 城市群城市用地扩张质量分析

城市用地扩张是一个涉及社会、经济和生态等方面的综合过程,为了全面地了解中国城市群的城市用地扩张质量,本文对10个城市群的城市用地扩张与人口密度、GDP密度的协同程度进行分析。

4.1.1 城市用地扩张与人口增长的协同程度分析 计算反映城市用地扩张和人口增长关系的协同发展系数($Ratio_{POP}$),并根据已有的研究成果^[53-55]将10个城市群的 $Ratio_{POP}$ 值划分为:人口—土地基本协同型($Ratio_{POP} = 1$)、人口快速增长型($Ratio_{POP} > 1$)和土地过快扩张型($0 < Ratio_{POP} < 1$)。由表3可知,不同时期不同发育等级的城市群“人口—土

表3 城市用地与人口增长、经济增长协同发展指数

Tab. 3 Temporal coevolution indexes of urban land with population and GDP

城市群	<i>Ratio_{POP}</i>					<i>Land_{GDP}</i>				
	1990— 1995年	1995— 2000年	2000— 2005年	2005— 2010年	2010— 2015年	1990— 1995年	1995— 2000年	2000— 2005年	2005— 2010年	2010— 2015年
京津冀城市群	0.97	0.89	1.00	1.02	1.05	3.49	4.85	4.74	7.16	7.44
长三角城市群	0.94	0.95	0.94	0.97	0.96	1.62	2.85	1.35	2.31	3.37
珠三角城市群	0.99	0.99	1.00	0.90	1.02	1.23	2.55	1.63	2.77	3.19
成渝城市群	1.00	0.88	0.94	0.96	1.00	1.26	1.77	1.26	2.20	1.12
中原城市群	1.00	0.90	0.77	0.94	0.96	1.51	2.97	2.49	3.28	4.92
长江中游城市	0.93	0.90	1.00	0.95	0.98	4.52	5.54	3.97	5.19	7.11
辽中南城市群	0.93	0.93	0.96	0.85	0.92	4.63	5.56	3.19	2.58	1.98
北部湾城市群	1.24	0.94	1.00	0.91	1.14	8.29	9.09	6.28	7.89	8.04
天山北坡城市群	0.85	0.85	1.00	0.97	1.03	4.51	6.73	3.86	5.62	6.69
哈长城市群	0.95	0.75	1.00	0.97	1.06	5.32	6.83	7.13	6.41	3.83

地”协同程度呈现出明显的差异性。1990—2005年期间，中国城市群城市用地扩张与人口密度增长整体协同程度呈现波动增长的趋势，人口—土地基本协同型占比由最初的20%提升到60%；2005—2015年期间，整体协同程度逐步增强。主要是因为1990—2005年期间，城市群的新城、新区的建设、外商投资的加大，推动了城市用地的快速扩张，尤其是设立不同等级的开发区，加速了城市用地的扩张；国家相关城市发展政策倾斜于城市群，吸引大型企业向城市群地区布局，导致城市群的城市用地规模迅速增加，出现低密度扩张现象。同时，由于城市对人口集聚的滞后性以及户籍制度的制约性，城市用地扩张明显快于人口增长，人口与城市用地协同程度不高。2005—2015年期间，随着经济的发展，城市用地扩张与人口城镇化的协同程度逐步强化，表明城市群城市用地扩张由低密度向紧凑型转变，扩张质量有所提升。结果与2006年政府实施《城市规划编制办法》以来^[59]，注重控制城市用地扩张的情况相符。

4.1.2 城市用地扩张与经济增长的协同程度分析 计算反映城市用地扩张和经济增长关系的经济弹性系数 ($Land_{GDP}$)，并根据 $Land_{GDP}$ 将10个城市群的协同类型划分为：经济或土地收缩型 ($Land_{GDP} < 0$)、土地扩张型 ($0 \leq Land_{GDP} < 1$)、经济—土地基本协同型 ($1 \leq Land_{GDP} < 5$) 和经济增长型 ($Land_{GDP} \geq 5$)。由表3可知，城市群GDP的增长远远超过了城市用地扩张。表3可以看出，1990—2015年期间，所有城市群的经济弹性系数始终大于1，整体上协同程度较好，部分城市群属于经济增长型。说明城市群经济增长要高于城市用地扩张，城市群的城市用地创造经济的效率非常显著，这与各地政府将城市用地扩张作为促进经济增长常用手段息息相关^[60-61]。

4.2 城市用地扩张的景观生态效应

图5可以看出，1990—2015年期间10大城市群的景观变化情况。PLAND和LPI指数呈现上升趋势。其中，珠三角城市群的PLAND和LPI表现出比其他9个城市群更为陡峭的趋势，而成渝城市群和长三角城市群表现出更为平缓的趋势。LSI、NP和PD指数，京津冀城市群的三个指标呈现波动下降的趋势；珠三角城市群、长三角城市群、成渝城市群的三个指标呈现出波动上升的趋势；中原城市群的3个指标在1990—1995年期间有所上升，此后呈现持续下降的趋势；长江中游城市群各项指标先是上升，然后略有下降；辽中南城市群呈倒“U”型，1995年达到峰值，随后出现下降；天山北坡城市群、哈长

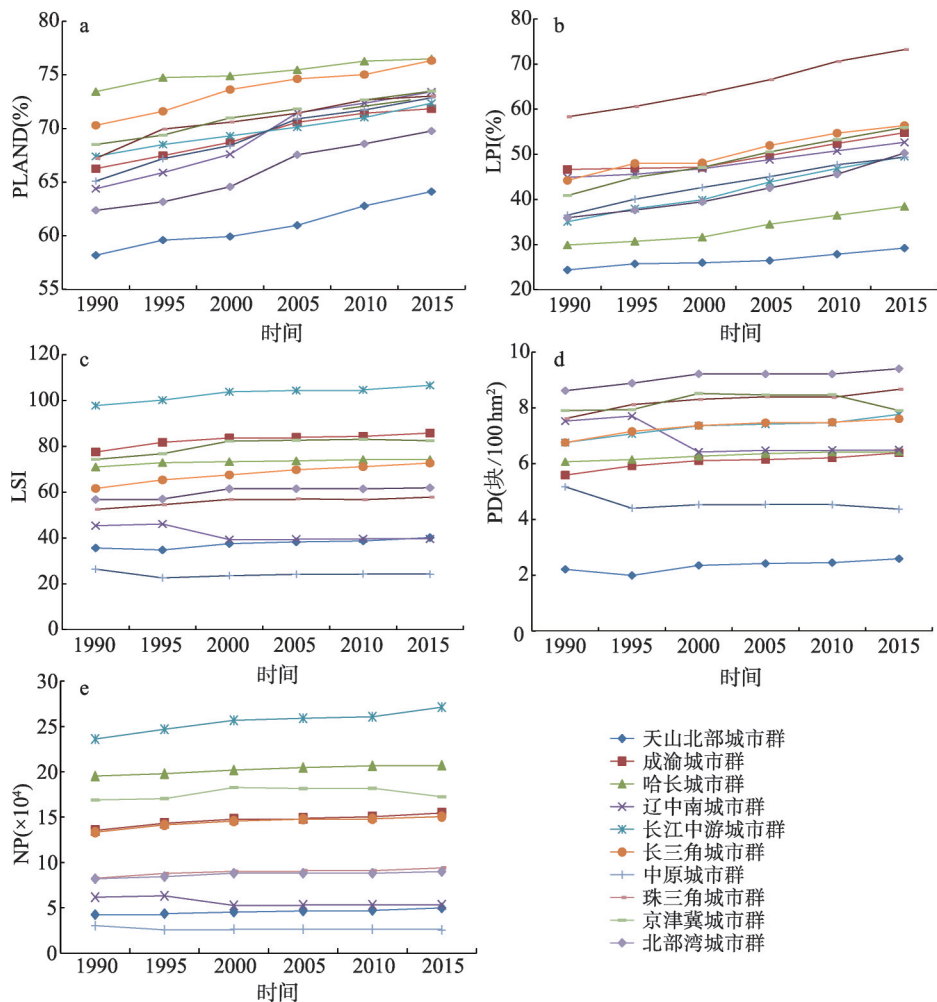


图5 城市群景观格局指数变化趋势

Fig. 5 Landscape pattern indexes change in urban agglomerations

城市群、北部湾城市群的3个指标表现比较稳定。城市用地扩张“吞没”了郊区和农村地区,不仅改变城市群的空间格局,还会影响城市群生态系统的完整性和稳定性。NP和PD指数的增加,表现出城市群城市用地景观格局破碎化程度提升;LSI指数的增加,反映城市群城市用地形状的复杂性上升,城市用地扩张强度变化波动性较大;PLAND和LPI的增加,表现出城市群城市用地之间的相互作用越来越大,扩张模式以“核心—边缘”为主。

5 结论

基于1990—2015年中国城市群城市用地遥感监测数据,本文综合运用城市用地扩张强度指数、城市用地扩张强度差异指数、景观扩张指数、景观格局指数等方法,对城市群城市用地扩张特征、扩张质量及景观生态效应等综合信息进行监测分析,得到以下结论:

(1) 1990—2015年,各个城市群城市用地面积持续增加,建成区的范围持续扩张。

扩张强度整体呈现“上升—下降”的趋势,1990—2005年,10个城市群城市用地扩张强度呈现上升趋势,该时期受到市场经济制度的改革和城市群发展的重视,城市之间的相互作用不断增强,致使城市群的城市用地扩张进入快速发展阶段,导致城市用地扩张强度达到极大值;2005年之后,扩张强度呈现下降态势,受经济发展和城市规划的限制,城市用地扩张强度有所放缓。区域差异上,城市群总体上呈现不均衡布局的趋势,高速扩张区域主要分布在沿海地区。从全国视角来看,东部高于中、西、东北部,整体城市群快速扩张的中心由东向西移动。

(2) 城市群城市用地空间扩张模式以边缘式和飞地式两种模式并存,不同发育等级之间具有明显差异性。成熟型城市群的空间结构比较稳定,核心城市的生长极效应明显,对周边区域的辐射作用增强,城市用地扩张主要以核心城市为中心向边缘地区进行圈层式蔓延。成长型城市群和培育型城市群的空间结构初具雏形或尚未形成,核心城市尚未形成较强的辐射作用,对周边区域的引力不足,城市用地扩张主要集中在核心城市和具有交通优势的区域。

(3) 城市群整体上“人—地”协同程度逐步增强。其中,“人口—土地”协同程度方面呈现上升趋势,1990—2005年期间,城市群的新城、新区的建设以及外商投资的加大,加速了城市用地的扩张,导致城市群的城市用地规模迅速增加。同时,由于城市对人口集聚的滞后性以及户籍制度的制约性,城市用地扩张明显快于人口增长,人口与城市用地协同程度不高,面临着低密度的城市用地扩张,导致空间扩张失控;2005—2015年期间,城市群对产业结构进行升级,人口集聚的效应越来越凸显,城市用地规模由急剧增加向稳定增长转变,促进“人口—土地”协同程度逐步增强,表明城市群城市用地扩张由低密度向紧凑型转变。“经济—土地”协同关系方面,以经济快速增长型为主,这与各地政府将城市用地扩张作为促进经济增长常用手段息息相关。

(4) 目前,城市群城市用地的面积持续增加、景观格局不稳定等问题突出。为了实现城市群国土空间高质量发展和人地关系的协同发展,需要尽快划定城市群的开发边界,严格控制城市群的城市用地扩张强度和模式,加快中小城市的发展,促进城市群城市用地扩张均衡发展;提高城市用地扩张与人口、经济增长的协同程度,将城市群开发边界与人口、经济挂钩,避免城市用地扩张和人口增长过快;进一步评价城市群区域的资源与环境承载能力,制定不同发育等级的城市群城市用地规模标准,兼顾城市用地质量和生态环境保护,逐步实现城市群国土空间高质量发展。

(5) 本研究从城市群尺度分析了中国城市用地的扩张特征、扩张质量及其景观生态效应,对全面认知城市群城市用地扩张特征具有重要作用。但城市用地扩张是一个涉及社会、经济、生态等发展要素的复杂系统,本研究只是从宏观尺度对城市群城市用地扩张特征进行探索性分析,对于更深层次的影响因素解析还不够,在后续的研究中将进一步剖析不同发育等级城市群城市用地的影响因素,据此识别城市群城市用地扩张的机理机制,从而更好地为不同发育等级的城市群国土空间规划提供针对性的参考信息。

参考文献(References)

- [1] Schneider A, Woodcock C E. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. *Urban Studies*, 2008, 45(3): 659-692.
- [2] Tayyebi A, Perry P C, Tayyebi A H. Predicting the expansion of an urban boundary using spatial logistic regression and hybrid raster-vector routines with remote sensing and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(4): 639-659.
- [3] Song W, Deng X Z. Effects of urbanization-induced cultivated land loss on ecosystem services in the North China Plain.

- Energies, 2015, 8(6): 5678-5693.
- [4] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside. *Nature*, 2017, 548(7667): 275-277.
- [5] Pijanowski B C, Tayyebi A, Delavar M R, et al. Urban expansion simulation using geospatial information system and artificial neural networks. *International Journal of Environmental Research*, 2009, 3(4): 493-502.
- [6] Xu H Q, Ding F, Wen X L. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 2(2): 74-79.
- [7] Hu X F, Zhou W Q, Qian Y G, et al. Urban expansion and local land-cover change both significantly contribute to urban warming, but their relative importance changes over time. *Landscape Ecology*, 2017, 32(4): 763-780.
- [8] Liu M L, Tian H Q, Chen G S, et al. Effects of land-use and land-cover change on evapotranspiration and water yield in China during 1900-2000. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1193-1207.
- [9] Su S L, Ma X Y, Xiao R. Agricultural landscape pattern changes in response to urbanization at ecoregional scale. *Ecological Indicators*, 2014, 40: 10-18.
- [10] Liu Y Q, Song W, Deng X Z. Understanding the spatiotemporal variation of urban land expansion in oasis cities by integrating remote sensing and multi-dimensional DPSIR-based indicators. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 23-37.
- [11] Xu X L, Min X B. Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in China using remote sensing data. *Cities*, 2013, 35: 104-113.
- [12] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [13] Wang Cuiping, Wang Haowei, Li Chunming, et al. Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 942-954. [王翠平, 王宏伟, 李春明, 等. 基于DMSP/OLS影像的我国主要城市群空间扩张特征分析. *生态学报*, 2012, 32(3): 942-954.]
- [14] Hamidi S, Ewing R. A longitudinal study of changes in urban sprawl between 2000 and 2010 in the United States. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 72-82.
- [15] Shaw R, Das A. Identifying peri-urban growth in small and medium towns using GIS and remote sensing technique: A case study of English Bazar urban agglomeration, West Bengal, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2018, 21(2): 159-172.
- [16] Sahana M, Hong H Y, Sajjad H. Analyzing urban spatial patterns and trend of urban growth using urban sprawl matrix: A study on Kolkata urban agglomeration, India. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 1557-1566.
- [17] Kovács Z, Farkas Z J, Egedy T, et al. Urban sprawl and land conversion in post-socialist cities: The case of metropolitan Budapest. *Cities*, 2019, 92: 71-81.
- [18] Bagheri B, Tousi S N. An explanation of urban sprawl phenomenon in Shiraz Metropolitan Area (SMA). *Cities*, 2018, 73: 71-90.
- [19] Huang Jinchuang, Lin Haoxi. Spatial evolution analysis and multi-scenarios simulation of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 506-517. [黄金川, 林浩曦. 京津冀城市群多情景空间演化模拟. *地理研究*, 2017, 36(3): 506-517.]
- [20] Ou Weixin, Zhang Zhen, Tao Yu. Multi-scale correlation analysis of urban landscape pattern and PM_{2.5} concentration in the Yangtze River Delta. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(7): 11-18. [欧维新, 张振, 陶宇. 长三角城市土地利用格局与PM_{2.5}浓度的多尺度关联分析. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(7): 11-18.]
- [21] Shen Wei, Lu Fengxian, Qin Yaochen, et al. Analysis of temporal-spatial patterns and influencing factors of urban ecosystem carrying capacity in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3937-3951. [沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 等. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(11): 3937-3951.]
- [22] Shui Li, Pan Hongyi, Zhang Qiuyue, et al. Spatial-temporal coupled coordination of urban and cultivated land use efficiency in Chengdu-Chongqing urban agglomeration. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(6): 261-268. [税丽, 潘洪义, 张秋月, 等. 成渝城市群城市土地—耕地利用效率时空耦合研究. *水土保持通报*, 2017, 37(6): 261-268.]
- [23] Zhou Chunshan, Jin Wanfu, Shi Chenyi. Development strategy of the Pearl River Delta urban agglomeration under the current socioeconomic situation. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 302-312. [周春山, 金万富, 史晨怡. 新时期珠江三角洲城市群发展战略的思考. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 302-312.]
- [24] Xu Yunlu, Lei Guoping. Study on evolution of urban land structure in Liaozhongnan city groups. *Economic Geography*, 2018, 38(1): 69-77. [许芸鹭, 雷国平. 辽中南城市群城市用地结构的时空演变分析. *经济地理*, 2018, 38(1): 69-77.]

- [25] Zhang Suwen, Yang Qingshan. The core-periphery structure and the growth stage of Harbin-Changchun urban agglomeration. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1699-1706. [张苏文, 杨青山. 哈长城市群核心—外围结构及发展阶段判断研究. *地理科学*, 2018, 38(10): 1699-1706.]
- [26] Wang Wantong, Sun Ting, Wang Jinxia, et al. Annual dynamic monitoring of regional ecosystem service value based on multi-source remote sensing data: A case of Central Plains urban agglomeration region. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(4): 680-687. [王万同, 孙汀, 王金霞, 等. 基于多源遥感数据的区域生态系统服务价值年际动态监测: 以中原城市群为例. *地理科学*, 2019, 39(4): 680-687.]
- [27] Yang Yong, Ren Zhiyuan, Fan Xinsheng. Land use comprehensive evaluation and regionalization in Zhongyuan urban agglomeration. *Economic Geography*, 2017, 37(9): 177-184. [杨勇, 任志远, 樊新生. 中原城市群土地利用综合评价与分区研究. *经济地理*, 2017, 37(9): 177-184.]
- [28] Fang Chuanglin, Gao Qian, Zhang Xiaolei, et al. Spatiotemporal characteristics of the expansion of an urban agglomeration and its effect on the ecoenvironment: Case study on the northern slope of the Tianshan Mountains. *Science China Terrae*, 2019, 49(9): 1413-1424. [方创琳, 高倩, 张小雷, 等. 城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响: 以天山北坡城市群为例. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(9): 1413-1424.]
- [29] Wang Chenggang, Ning Xiaogang, Wang Hao, et al. Spatial pattern change of China urban agglomerations using nighttime light data. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(6): 176-186. [王成港, 宁晓刚, 王浩, 等. 利用夜间灯光数据的城市群格局变化分析. *测绘科学*, 2019, 44(6): 176-186.]
- [30] Yang Yang, Li Jingya, He Chunyang, et al. A comparative study on spatiotemporal dynamics of city size distribution among three urban agglomerations in Bohai Rim: Based on the analysis and perspective of nighttime light data from 1992 to 2012. *Economic Geography*, 2016, 36(4): 59-69. [杨洋, 李雅静, 何春阳, 等. 环渤海地区三大城市群城市规模分布动态比较: 基于1992—2012年夜间灯光数据的分析和透视. *经济地理*, 2016, 36(4): 59-69.]
- [31] Fang Chuanglin. Important progress and future direction of studies on China's urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1130-1144. [方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向. *地理学报*, 2014, 69(8): 1130-1144.]
- [32] Wang Liwei, Feng Changchun. Spatial expansion pattern and its driving dynamics of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region: Based on nighttime light data. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2155-2169. [王利伟, 冯长春. 转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制: 基于夜间灯光数据方法. *地理学报*, 2016, 71(12): 2155-2169.]
- [33] Blaschke T, Hay G J, Weng Q, et al. Collective sensing: Integrating geospatial technologies to understand urban systems—An overview. *Remote Sensing*, 2011, 3(12): 1743-1776.
- [34] Yang X J. Integration of remote sensing with gis for urban growth characterization//Jiang B, Yao X. *Geospatial Analysis and Modelling of Urban Structure and Dynamics*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010: 223-250.
- [35] Wang Jing, Fang Chuanglin. Growth of urban construction land: Progress and prospect. *Progress in Geography*, 2011, 30(11): 1440-1448. [王婧, 方创琳. 城市建设用地增长研究进展与展望. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1440-1448.]
- [36] 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. [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. *地理研究*, 2017, 36(1): 74-84.]
- [37] Deng X Z, Huang J K, Rozelle S, et al. Growth, population and industrialization, and urban land expansion of China. *Journal of Urban Economics*, 2008, 63(1): 96-115.
- [38] Deng X Z, Huang J K, Rozelle S, et al. Impact of urbanization on cultivated land changes in China. *Land Use Policy*, 2015, 45: 1-7.
- [39] Li J M, Han X L, Li X, et al. Spatiotemporal patterns of ground monitored PM_{2.5} concentrations in China in recent years. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2018, 15(1): 1-15.
- [40] Fang Chuanglin, Yao Shimou, Liu Shenghe, et al. *China Urban Cluster Development Report*. Beijing: Science Press, 2011. [方创琳, 姚士谋, 刘盛和, 等. 中国城市群发展报告. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [41] The State Council of the People's Republic of China. *National Main Function Zone Planning*. Beijing: People's Publishing House, 2015. [国务院. 全国主体功能区规划. 北京: 人民出版社, 2015.]
- [42] Fang C L, Wang Z B, Ma H T. The theoretical cognition of the development law of China's urban agglomeration and academic contribution. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 651-665. [方创琳, 王振波, 马海涛. 中国城市群形成发育规律的理论认知与地理学贡献. *地理学报*, 2018, 73(4): 651-665.]
- [43] Liu X P, Hu G H, Chen Y M, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images

- based on the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 227-239.
- [44] Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [45] Bureau of Statistics of China. *China City Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press. [中华人民共和国国家统计局. *中国城市统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社.]
- [46] Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press. [中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社.]
- [47] Wang Haijun, Zhang Bin, Liu Yaolin, et al. Multi-dimensional analysis of urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1076-1092. [王海军, 张彬, 刘耀林, 等. 基于重心—GTWR模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析. *地理学报*, 2018, 73(6): 1076-1092.]
- [48] Guan Xingliang, Fang Chuanglin, Zhou Min, et al. Spatial and temporal characteristics of spatial expansion of urban land in Wuhan urban agglomeration. *Journal of Nature Resources*, 2012, 27(9): 1447-1459. [关兴良, 方创琳, 周敏, 等. 武汉城市群城镇用地空间扩展时空特征分析. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1447-1459.]
- [49] Xu C, Liu M S, Zhang C, et al. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, 2007, 22(6): 925-937.
- [50] Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5): 671-682.
- [51] Riitters K H, O'Neill R V, Hunsaker C T, et al. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, 1995, 10(1): 23-29.
- [52] Seto K C, Fragkias M. Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape Ecology*, 2005, 20(7): 871-888.
- [53] Zhang Lin, Wang Yahui, Guo Yuna. A research on the coordination of land urbanization and economic urbanization in China. *East China Economic Management*, 2016, 30(6): 111-117. [张琳, 王亚辉, 郭雨娜. 中国土地城镇化与经济城镇化的协调性研究. *华东经济管理*, 2016, 30(6): 111-117.]
- [54] Yang Yanzhao, Feng Zhiming, Zhao Yande, et al. Coordination between urban land expansion and population growth in China. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1668-1678. [杨艳昭, 封志明, 赵延德, 等. 中国城市土地扩张与人口增长协调性研究. *地理研究*, 2013, 32(9): 1668-1678.]
- [55] Xu Xueshuang, Bao Anming, Chang Cun, et al. Characteristics of urban built-up expansion and coordination of man-land allocation in the major cities in Xinjiang. *Economic Geography*, 2017, 37(10): 92-99. [许雪爽, 包安明, 常存, 等. 新疆重点城市建设用地扩张与人地配置协调性分析. *经济地理*, 2017, 37(10): 92-99.]
- [56] The State Council of the People's Republic of China. *National Urban System Planning (2016-2030)*. Beijing: People's Publishing House, 2016. [国务院. *全国城镇体系规划(2016-2030)*. 北京: 人民出版社, 2016.]
- [57] Ye Yumin, Chen Bingxin. Development status and dynamic characteristics of urban agglomeration in China. *Urban Problems*, 2014(4): 9-16. [叶裕民, 陈丙欣. 中国城市群的发育现状及动态特征. *城市问题*, 2014(4): 9-16.]
- [58] Wang Deli, Yang Qingshan. Rationality diagnosis and evolution characteristics of urban agglomeration scale structure in China. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(9): 123-132. [王德利, 杨青山. 中国城市群规模结构的合理性诊断及演变特征. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(9): 123-132.]
- [59] Zhu Zhijun. Procedure and methods of modern technology in the urban overall planning stage of new editor of *Urban Planning Establishment Means*. *Shanghai Urban Planning Review*, 2007(4): 12-15. [朱志军. 新版《城市规划编制办法》总体规划阶段的现代技术应对与方法. *上海城市规划*, 2007(4): 12-15.]
- [60] Xu J. Governing city-regions in China: Theoretical issues and perspectives for regional strategic planning. *Town Planning Review*, 2008, 79(2/3): 157-186.
- [61] Lin G C S, Yi F X. Urbanization of capital or capitalization on urban land? Land development and local public finance in urbanizing China. *Urban Geography*, 2011, 32(1): 50-79.

Spatio-temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations

OUYANG Xiao^{1,2}, ZHU Xiang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. Hunan Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Utilization, Changsha 410007, China)

Abstract: Comprehensive analysis of the characteristics, quality, and ecological effects of urban land expansion would be extremely valuable in high-quality development planning and decision-making. Using data of ten urban agglomerations of China from 1990 to 2015 at varying levels of urban development, this study analyzed the degree of urban land expansion based on the "human-land" synergistic relationship and examined the spatio-temporal characteristics and landscape ecological effects of urban development. Various development indexes for population, economy, and urban land were evaluated, including the urban land expansion intensity index, the intensity differentiation index, the landscape expansion index, and the pattern index. The results of the study are as follows: (1) From 1990 to 2015, the built-up areas in the urban agglomerations expanded continuously, while the expansion intensity showed a fluctuating trend. The highest values of expansion intensity for developed urban agglomerations appeared before 2010, while for the developing areas, the highest values came after 2010. (2) Overall, there was an asymmetrical urban growth among the agglomerations, and the areas with high urban expansion were mainly distributed along the coastal zones. At the national level, the epicenter of rapid urban growth moved from east to west, with the urban expansion in eastern China being much faster compared with the central, western, and northeastern regions. (3) The evolution in urban land use displayed two main spatial patterns, namely edge expansion and outlying, which varied based on the level of urban development. The spatial pattern in the developed urban clusters was more stable, while in the developing areas, the spatial structure started to take shape but have yet to be formed. (4) Urban expansion sprawling over suburban and rural areas resulted in relatively high degrees of fragmentation and structural complexity and instability of the landscape pattern. (5) The man-land synergy in these urban agglomerations increased gradually over time while the economy-land interaction was generally high, indicating an improvement in the overall quality of urban growth. The results of this study highlight the need to have stricter supervision of urban expansion particularly in the early stages of city development, to foster the development of small and middle-sized cities, and to propose a more balanced approach in urban land expansion. The findings here provide valuable lessons for high-quality development of land use in urban agglomerations of China.

Keywords: urban agglomerations; urban land expansion; man-land synergy; landscape ecological effects