

城市用地扩张与生态环境保护的交互作用研究

——以长株潭城市群为例

欧阳晓^{1, 2, 3} 李勇辉³ 徐帆⁴ 陈建设⁵ 黄梅³¹

(1. 湖南财政经济学院 湖南省经济地理研究所, 中国湖南 长沙 410205;

2. 国土资源评价与利用湖南省重点实验室, 中国湖南 长沙 410007;

3. 湖南财政经济学院 工程管理学院, 中国湖南 长沙 410205;

4. 湘西州发展和改革委员会, 中国湖南 吉首 416000;

5. 湖南工业大学 商学院, 中国湖南 株洲 412007)

【摘要】: 城市用地扩张与生态环境保护的交互作用是城市群城市开发和生态环境保护要素流动的映射表现, 系统地构建其交互作用机制, 对于丰富城市群扩张理论和优化城市群空间结构具有重要意义。文章基于构建城市群城市用地扩张与生态环境保护的交互作用框架, 运用灰色关联度模型揭示二元之间的交互作用, 并将共生理论引入城市群扩张研究中, 从城市开发和生态保护二元共生视角提出研究城市用地扩张的新思路。研究表明: (1) 城市群城市用地扩张与生态环境保护之间存在较强的交互作用, 整体上表现出阶段性特征。(2) 由自然、经济社会和空间三个维度构成的“驱动—协调—约束”共生机制是实现城市用地扩张与生态环境保护共生发展的动力机制。生态环境保护通过分区管控、治理修复与城市用地扩张方面的监测预警、城市更新形成多维交互作用, 最终实现二者的共生发展。(3) 基于共生机制框架提出城市群城市用地扩张与生态环境保护二元共生发展的对策建议, 从而形成高效集约、生态安全、宜居宜业的城市群国土空间结构。

【关键词】: 城市群 生态环境保护 共生机制 高质量发展

【中图分类号】: FF299.27; F205 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2021) 07-0193-09

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^[1], 城市群对经济发展和城镇化具有重要推动意义, 我国政府规划了 19 个不同发育等级的城市群^[2]。城市群作为城市用地扩张最为活跃的区域, 正在发生大规模

作者简介: 欧阳晓(1990-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 讲师, 研究方向为区域规划与区域发展问题。E-mail:1075090536@qq.com
陈建设(1979-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 讲师, 研究方向为区域规划与区域发展。E-mail:19123728@qq.com

基金项目: 国土资源评价与利用湖南省重点实验室开放课题(SYS-ZX-202001); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ2011、2021JJ40015)

的城市用地扩张，并且大量农村人口迁入城市群以及城市用地大规模地侵占生态用地，引发了耕地流失、水资源和能源短缺、景观破碎化、PM_{2.5} 污染等一系列“城市群病”^[3-5]，给城市群可持续发展带来挑战。因此，定量分析城市群城市用地扩张与生态环境保护之间的交互作用，系统地构建其二元共生机制，能够丰富城市群扩张理论，同时对优化城市群可持续发展规划具有重要意义。

城市用地的快速扩张导致严重的生态环境问题，使得国内外关于城市用地扩张与生态环境保护之间的研究逐渐升温。目前，主要形成以下几个方面的研究成果：(1)从水资源、土地资源、气候环境等单一的生态环境要素视角出发，分析城市用地扩张对生态环境产生的影响^[6-9]，表明城市用地扩张对单一的生态环境要素造成压力，并产生负面影响。(2)从生态环境承载力、生态安全格局以及生态环境状况等视角出发^[10-12]，分析生态环境对城市用地扩张造成的影响，表明随着经济社会的发展，生态环境问题的频繁出现，对城市用地扩张产生制约作用。(3)从城市用地扩张与生态环境保护耦合协调的视角出发，研究两者之间的交互作用，表明两者之间存在非线性耦合的关系^[13-19]。总体而言，已有研究将城市扩张与生态保护交互作用看作是一种“静态”而非“动态”的过程，更多地关注生态环境方面，导致城市扩张与生态保护交互作用过程仍然属于黑盒子，缺乏对城市用地扩张与生态环境保护之间交互作用的定量研究。同时，尚未探讨城市扩张与生态保护之间协调共生的问题。因此，分析城市扩张与生态保护交互作用以及构建其二元共生机制对深化认识城市群扩张及优化调控至关重要。

随着湘江新区和长沙南部新城等城市群一体化发展战略实施以及芙蓉大道、洞（井铺）株（洲）路、潭州大道等一体化基础设施建设，长株潭城市群城市用地扩张规模将进一步扩大，对区域的资源环境承载造成巨大压力。鉴于此，本研究利用经济、社会以及土地等多元数据，运用灰色关联度模型，对 1995—2018 年期间城市群的城市用地扩张与生态环境保护之间的相互作用进行定量分析，并将共生理论引入城市群扩张研究中，构建城市扩张与生态保护二元共生机制，为城市开发与生态保护实现“共赢”提供新思路，以期为促进长株潭城市群一体化和高质量空间发展提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

长株潭城市群是长江中游城市群的重要组成部分，是湖南省的政治、经济、文化中心，正处于长江经济带、长江中游城市群等国家战略实施，国家自主创新示范区、“中国制造 2025”示范、创建国家装备制造业创新中心等多维城市群发展背景融合阶段。参照相关规划和研究成果，选取城市群都市区为本研究的实证研究区，包括长沙市区（芙蓉区、天心区、岳麓区、开福区、雨花区、望城区）、株洲市区（天元区、芦淞区、荷塘区、石峰区、渌口区）、湘潭市区（雨湖区、岳塘区）以及长沙县、湘潭县^[19-20]。都市区的行政区划面积为 8629km²，2018 年末总人口为 912.58 万人，GDP 为 9175.78 亿元，建成区面积为 1038.51km²。1995—2018 年期间，研究区城市用地面积增加了 679.55km²，是整个城市群中城市用地扩张和生态环境变化最活跃的区域。

1.2 数据来源

经济、社会和生态环境等方面的数据来源于 1996—2019 年湖南省、长株潭城市群以及长沙、株洲、湘潭三市的统计年鉴和政府工作报告。土地利用数据是利用 LandsatTM/ETM 遥感影像进行解译分类得到，整个分类过程包括影像预处理、感兴趣区选取、影像监督分类、精度验证，并按照生态一般用地（包括林地、草地和水域）、工业用地、城市用地等类别进行合并计算。另外，建成区的 GDP 密度和人口密度来源于建成区范围内 GDP 密度和人口密度的平均值；生态绿心补偿投入来源于涉及生态绿心地区的县（区）政府工作报告；都市农业增加值尚未纳入湖南省统计口径，本研究以农业增加值为依据，参照广州市都市农业增加值与农业增加值的比重，对长株潭城市群都市农业增加值进行计算。为了消除原始数据之间的维度和大小差异，本研究使用极大值和极小值法对原始数据进行归一化，其公式为：

$$\text{正向指标: } X_{ij} = (Z_{ij} - \min Z_{ij}) / (\max Z_{ij} - \min Z_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } X_{ij} = (\max Z_{ij} - Z_{ij}) / (\max Z_{ij} - \min Z_{ij}) \quad (2)$$

式中： Z_{ij} 是第 i 个系统 j 指标的值； X_{ij} 是 Z_{ij} 标准化值； $\max Z_{ij}$ 和 $\min Z_{ij}$ 是 Z_{ij} 中最大值和最小值。

1.3 研究方法

1.3.1 研究框架和指标筛选

(1) 研究框架。城市用地扩张与生态环境保护的交互作用是城市群经济社会和生态环境保护要素流动的映射表现。本研究从压力、状态和响应等 3 个层面构建了城市用地扩张与生态环境保护交互作用的研究框架。随着经济社会水平的提高，城市用地呈现增长的趋势，同时，人民生活水平的提高对生态环境的需求日益提升，对生态环境造成的压力也逐渐加大。这种“压力”又推动城市用地面积和土地开发强度的变化，改变城市用地的“状态”来影响生态环境。最终，生态环境在自我调节和管理干预的共同作用下从“压力”增长和“状态”变化的视角来“响应”处理人类行为的干扰^[21]。

压力系统。城市用地扩张对生态环境造成的压力主要来源于经济社会发展^[22-24]。经济发展方面，随着城市化进程中的城市用地面积的增加，生产、生活等方面需要消耗更多的水、电以及能源等资源来提高经济总量和社会质量，导致资源出现短缺和城市发展不可持续^[25-27]。此外，城市群城市用地扩张过程中造成的环境污染可能通过外部性和溢出效应引起区域跨界污染。社会发展方面，城市用地扩张增加了城市容量和居住空间，提高了居民收入和车辆数量，直接加剧了环境污染^[28]。此外，居民对文化、娱乐、健康等方面需求的提高，导致出现了更加复杂多变的生态环境压力^[29]。

状态系统。压力系统将推动土地利用状态的变化，包括城市用地扩张规模和城市用地扩张质量的变化，直接影响生态系统服务功能^[30-31]。城市用地扩张规模的大小，对生态环境承载力具有显著作用。其中，现有研究发现当城市用地规模超过资源承载力最大阈值后，就会产生负向影响，造成生态环境风险上升^[32-33]。城市用地扩张质量的高低，对土地资源保护具有重要影响。其中，农业用地、生态用地转向城市用地的有序程度决定城市用地扩张质量^[27,34]。同时，城市用地扩张质量的高低和生态空间的增减都对区域碳循环产生巨大的影响^[33,35-36]。

响应系统。生态环境状况是生态系统对社会经济综合作用的响应结果。生态系统通过资源消耗、环境约束以及环境负荷三个方面进行响应^[27]。其中，资源消耗方面，区域经济的增长需要对资源进行消耗，环境保护意识的缺乏和污染控制技术的落后，污染排放和环境状况将变得更加多样化、复杂化和不可持续化^[9,21,37]。环境约束和环境负荷两个方面，是生态系统响应的重要内容，能够直接反映生态系统健康的状况，城市用地扩张强度越高，排放的废气、废水和固体废物越多，生态系统就越脆弱。另外，生态治理是社会经济高质量的反映和生态文明建设的手段，包括生态补偿机制、环境保护投资以及非点源污染治理^[38-40]。

(2) 指标筛选。结合上述研究框架，参照现有研究结果^[23,35,40-41]，构建了城市用地扩张与生态环境保护交互作用评价指标体系。其中，经济发展和社会发展是压力系统的综合体现，经济发展主要从人均 GDP、都市农业增加值、工业增加值占比、第三产业增加值占比等方面影响生态环境状况；社会发展主要从人口、收入水平、科技创新等方面影响生态环境状况。城市用地规模和质量是状态系统的综合反映，通过扩张规模水平、扩张质量水平等指标体现。从资源消耗、环境约束、环境负荷以及生态治理等方面表征生态环境的响应系统，通过生态空间规模、环境治理投资规模、工业固废处理率等指标体现。

1.3.2 城市用地扩张与生态环境交互作用机制灰色关联度模型

(1) 关联系数和关联度。邓聚龙^[42]于 1982 年首次提出灰色关联度模型，用于研究不确定性系统。通过对比两个系统时间序列的几何相似程度，其形状相似程度越高，两个系统之间的关联程度也越高。本研究运用该方法探索城市用地扩张与生态环境保护指标之间的几何相似性，计算两个系统要素之间的关联程度，确定其交互作用强度。

$$\text{确定灰色关联系数: } \xi_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + \rho \Delta_{\max}} \quad (3)$$

$$\text{计算灰色关联度: } \gamma_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k \xi_{ij}(t) \quad (4)$$

式中： $\xi_{ij}(t)$ 为城市用地扩张与生态环境保护两个系统指标之间的灰色关联系数； $\Delta_{\max}$ 和 $\Delta_{\min}$ 分别为两个系统指标之间的差异最大值和最小值； ρ 为分辨系数，一般取值为 0.5； γ_{ij} 为两个系统指标之间的关联程度； k 为城市用地扩张系统包含指标的数量。

(2) 关联度分级。根据公式 (4) 对 $\xi_{ij}(t)$ 求平均值，得到各个时期长株潭城市群城市用地扩张与生态环境保护两个系统指标之间的关联程度 γ_{ij} 。 γ_{ij} 的取值范围为 0~1，值越大，关联程度越高；反之则反。参照相关对关联程度分级的研究^[9]，其中， $0 < \gamma_{ij} \leq 0.35$ 时，指标之间关联程度低； $0.35 < \gamma_{ij} \leq 0.65$ ，指标之间关联程度中等； $0.65 < \gamma_{ij} \leq 0.85$ 时，指标之间关联程度高； $0.85 < \gamma_{ij} \leq 1.00$ 时，指标之间关联程度极高。

(3) 胁迫作用程度。根据公式 (5) 计算城市用地扩张系统中的各个一级指标层与生态环境保护系统所有指标的关联度，然后对各个一级指标层相应的关联度求平均值，即为城市用地扩张各个一级指标层对生态环境保护系统的胁迫作用：

$$c_i = \frac{1}{E \cdot S} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^E \gamma_{ij} \quad (5)$$

式中： c_i 为胁迫指数，指数越高，胁迫作用越强； E 为生态环境保护系统指标的数量； S 为城市用地扩张系统各个一级指标层的指标数量。同理，可计算生态环境保护系统各个一级指标层对城市用地扩张的约束作用程度。

2 结果分析

2.1 城市用地扩张与生态环境保护的交互作用

城市用地的实质是经济发展、社会发展以及土地利用变化的空间载体，承载着城市开发所有的人为活动，因此，本研究将经济社会压力和土地利用状态两个系统的要素归纳到城市用地扩张系统。利用公式 (4) 和 (5) 对城市用地扩张与生态环境保护之间要素关联程度进行测算，并对不同时期指标之间的关联度求平均值，得到两个系统指标关联度表，用于计算城市用地扩张与生态环境保护之间的交互作用强度。

2.1.1 城市用地扩张对生态环境保护的胁迫作用

城市用地扩张、人口增长和经济集聚对城市群生态环境具有明显影响，可以看出，影响最为显著的 3 项指标为工业增加值占比 (0.669)、人均道路面积 (0.656)、工业用地面积占比 (0.654)，表明工业的发展、城市用地的规模扩大对城市群生态环境的影响显著。从各个子系统来看，研究期间经济发展水平、社会发展水平、扩张规模水平以及扩张质量水平对生态环境产生的胁迫作用趋于减弱 (图 1)。1995—2000 年，经济发展水平的胁迫作用最强，胁迫指数为 0.658，扩张规模水平、扩张质量水

平以及社会发展水平次之，胁迫指数依次为 0.652、0.646、0.628。2000—2005 年，扩张规模水平的胁迫作用最强，胁迫指数为 0.646，经济发展水平、扩张质量水平以及社会发展水平次之，胁迫指数依次为 0.645、0.634、0.616。2005—2010 年期间，扩张规模水平的胁迫作用最强，胁迫指数为 0.643，经济发展水平、扩张质量水平以及社会发展水平次之，胁迫指数依次为 0.641、0.625、0.621。2010—2015 年，扩张规模水平的胁迫作用最强，胁迫指数为 0.649，经济发展水平、扩张质量水平以及社会发展水平次之，胁迫指数依次为 0.628、0.615、0.603。2015—2018 年，扩张规模水平的胁迫作用最强，胁迫指数为 0.622，经济发展水平、扩张质量水平以及社会发展水平次之，胁迫指数依次为 0.613、0.590、0.587。

2.1.2 生态环境保护对城市用地扩张的约束作用

城市群生态环境保护各要素对城市用地扩张表现出较强的约束作用，可以看出，影响最为显著的 3 项指标为水资源总量（0.682）、生态绿心补偿投入（0.671）、生态一般用地面积（0.669），反映城市群的生态绿心的保护、水资源的短缺以及生态空间的需求是约束城市群无序扩张的主要因素。从各个子系统来看，研究期间，生态现状、环境治理、资源消耗以及环境负荷对城市用地扩张的约束作用大小呈现波动性减弱的特征（图 2）。1995—2000 年，生态现状的约束作用最强，约束指数为 0.682，环境治理、资源消耗以及环境负荷次之，约束指数依次为 0.662、0.591、0.565。2000—2005 年期间，生态现状的约束作用最强，约束指数为 0.684，环境治理、资源消耗以及环境负荷次之，约束指数依次为 0.670、0.596、0.582。2005—2010 年，生态现状的约束作用最强，约束指数为 0.676，环境治理、资源消耗以及环境负荷次之，约束指数依次为 0.638、0.621、0.601。2010—2015 年，生态现状的约束作用最强，约束指数为 0.668，资源消耗、环境治理以及环境负荷次之，约束指数依次为 0.628、0.625、0.586。2015—2018 年，生态现状的约束作用最强，约束指数为 0.649，资源消耗、环境治理以及环境负荷次之，约束指数依次为 0.613、0.606、0.571。

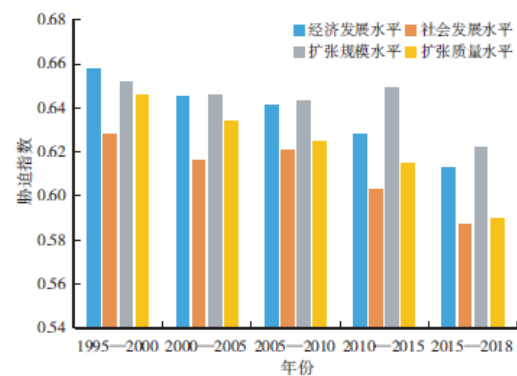


图 1 城市用地扩张对生态环境保护的胁迫作用

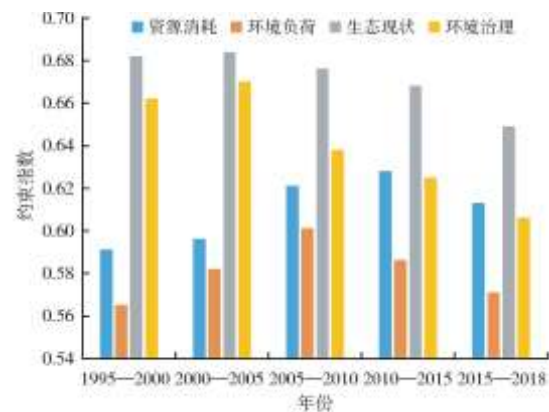


图 2 生态环境对城市用地扩张的约束作用

2.2 基于共生理念的城市用地扩张与生态环境保护共生机制分析

城市用地扩张既要满足城市群发展的需求，又要形成最优化的国土空间。城市用地扩张与生态环境保护共生机制的目标就是协调城市用地扩张与生态环境保护之间的关系，以保护生态功能为前提，研究城市群城市用地扩张的时空演变、扩张质量与扩张机制，同时，城市群国土空间规划需要综合考虑生态功能，实现生态多功能复合价值的提升，通过绿色发展、共享发展、协调发展等策略，最终实现城市群高质量发展。

城市用地是城市群经济、社会发展的空间载体，而生态环境是城市群经济、社会发展的重要保障。共生理论是系统理论的优化，该理论认为复杂的系统中，当控制参数达到某个阈值时，系统内所有元素之间的相互协调合作关系将取代相对独立和相互竞争的关系^[43]，该理论不仅用于生物之间的关系，还被运用到城市群尺度的城市用地扩张与生态环境的关系中，生产生活对生态环境的胁迫作用需要用共生作用来减缓，并对破坏生态环境的经济发展方式进行限制。

城市群城市用地扩张与生态环境保护之间存在较强的交互作用。因此，基于共生理论从“驱动—协调—约束”机制体系提出城市用地扩张与生态环境保护二元共生机制（图 3）。其中，约束机制包括自然条件、生态环境等因素，是城市群共生机制形成的基础因素；驱动机制包括人口集聚、创新驱动、城镇化等因素，是城市群共生机制形成的动力因素；协调机制包括交通、信息等空间要素流，主要受政府规划和政策的影响，是城市群共生机制形成的调控因素。三大机制不是独立作用于共生机制，而是综合作用于城市群共生机制的形成。约束机制包括自然、生态等基础性因素，降低对驱动机制的制约作用，同时提升协调机制的相互作用；驱动机制包括经济、社会等驱动性因素，降低对约束机制的胁迫作用，同时，引导和调控协调机制；协调机制包括规划调控、引导政策等调控性因素，降低对约束机制的胁迫作用，同时对驱动机制进行反馈与调整。

2.2.1 自然维度：二元共生的约束机制

资源消耗对城市用地扩张的约束作用逐年增加，表明水、土地、能源等资源短缺能够阻碍城市用地扩张。自然维度包括地形、自然、生态环境等因素，是多要素的集合。对于城市用地扩张来说，自然系统是城市用地扩张的基础，决定了扩张的规模和方向。城市用地扩张导致自然维度的破坏，引发自然系统的平衡失调，从而制约着城市用地扩张与生态环境保护共生机制形成。因此，城市群发展过程中应该贯彻“绿水青山就是金山银山”理论（简称“两山”理论），缓解资源环境和生态问题带来的国土开发压力。对生态环境脆弱地区进行分区分管和修复治理，并实时监测资源环境承载力，划定生态安全格局和永久基本农田保护线，避免城市用地的无序扩张，共建山水林田湖草生态共同体，保障城市群的生态安全。

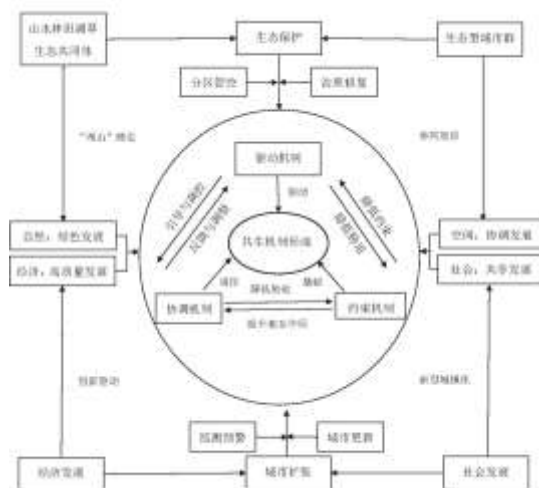


图 3 城市用地扩张与生态环境保护共生机制

2.2.2 经济社会维度：二元共生的驱动机制

环境负荷对城市用地扩张的约束作用先增加后减少，表明随着经济社会发展水平的提升，政府增加了环境治理的成本，使得环境现状和生态现状得到改善，从而驱动城市用地扩张与生态环境保护共生机制形成。城市群的快速城市化和工业化，使得经济活动从第一产业（农村地区）转移到第二和第三产业（城市地区），农村人口加速向城市集聚，加大了环境的负荷。因此，从经济维度来看，创新驱动背景下城市用地扩张对集聚效应的经济红利进行重塑和提升，绿色发展和高质量增长是可以实现的。城市群的经济应该依托自主创新示范区的建设，重点发展低污染、高附加值的战略性新兴产业和培育壮大高端生产服务业。此外，从社会维度来看，继续实施新型城镇化战略，通过坚持节约集约用地的原则，实施最严格的土地管理制度和制定国土空间规划，提高单位投入的产出效益，推动城市群城市用地的高效集约扩张。

2.2.3 空间维度：二元共生的协调机制

城市群尺度下的城市用地扩张与生态环境保护之间关系错综复杂，除了自然维度和经济社会维度以外，空间维度也是重要的影响因素。城市群区域间缺乏产业的空间联动，城市用地存在无序扩张现象，以上问题从空间维度影响着生态系统健康。空间联动是城市群一体化发展水平的重要体现，新型城镇化和国土空间规划要求增强核心城市的辐射效应，其他市、县的功能和定位日趋清晰，产业分工和产业合理梯度分配效益逐步明显，空间相互作用和利益协调将城市群的核心城市与其他市、县整合起来，推动其他市、县的城市用地向核心城市靠拢。因此，从空间维度来看，城市群应该注重区域间的空间联动与共享，进一步设计有效的利益机制，整合区域的内部资源和发展要素，推进城市更新工作、挖掘现有城市用地潜力，协调生态空间限制和开发空间需求，形成城市开发与生态保护二元共生格局，构建起宜居宜业的国土空间结构。

3 结论与讨论

3.1 结论

城市群城市用地扩张与生态环境保护之间存在着复杂的交互作用，本文通过灰色关联模型量化两者之间的胁迫作用和制约作用，并试图基于共生理论从自然、经济社会和空间三个维度，提出城市用地扩张与生态环境保护二元共生机制，对城市群实现空间高质量发展具有重要的意义。

(1) 城市群城市用地扩张与生态环境保护之间交互作用整体上表现出阶段性特征。其中，城市群城市用地扩张对生态环境保护的胁迫作用方面，经济发展水平、社会发展水平、扩张规模水平以及扩张质量水平都对生态环境保护产生胁迫作用，且呈现减弱的趋势；城市群生态环境保护对城市用地扩张的制约作用方面，生态现状、环境治理、资源消耗以及环境负荷对城市用地扩张的约束作用呈现波动性减弱的趋势。

(2) 城市用地扩张是城市群经济、社会发展的空间载体；生态环境保护是城市群经济、社会发展的重要保障。从自然、经济社会和空间三个维度构成的“驱动—协调—约束”共生机制是实现城市用地扩张与生态环境保护共生发展的动力机制。生态保护通过分区管控、治理修复与城市扩张方面的监测预警、城市更新形成多维交互作用，最终实现二者的共生发展。

3.2 讨论

(1) 经济发展水平、社会发展水平、扩张规模水平、扩张质量水平 4 个子系统对生态环境保护产生明显的胁迫作用。其中，工业增加值占比、人均道路面积、工业用地面积占比对生态环境保护的胁迫作用最强，表明工业规模和城市用地扩张导致空间

无序发展、资源过度消耗，从而对生态环境保护造成胁迫作用。与以往的研究结果相吻合，即单方面追求工业增加值和城市用地扩张导致用地效率下降，造成生态环境破坏。同时，胁迫作用变化趋势与城市群“两型”社会建设、创新驱动等发展战略目标相适应，随着长株潭城市群推动生产、生活的方式向绿色、生态、环保的方式转变，城市用地扩张质量和经济社会发展效率有所提升。同时，随着新型城镇化战略的实施以及国土空间新要求的提出，城市群空间管控意识和水平不断提高，城市群发展逐渐转向内涵式和集约化发展，无序扩张的现象有所控制，对生态环境的胁迫作用有所减弱。

资源消耗、环境负荷、生态现状、环境治理 4 个子系统对城市用地扩张具有较强的约束作用。其中，水资源总量、生态绿心补偿投入、生态一般用地面积对城市用地扩张的约束作用最强，表明水资源的不足、生态用地保护是城市用地扩张主要的制约因素。城市用地扩张需要水资源支撑，而生态用地保护是以国土空间管控的方式控制城市用地扩张，从而对城市用地扩张产生约束作用。与刘菁华等^[11]研究结果相吻合，即水资源的短缺和生态空间管控能够制约城市用地扩张。此外，严格的环境管控政策能够减轻大气、土壤等污染，对城市群的人居环境发展产生重要的正向作用，从而使得整个研究期间环境治理对城市用地扩张的约束作用逐渐降低。但是，目前城市群产业结构不合理、生态环境保护联防联控的体制尚未成熟，限制了改善生态环境现状的效率，同时，资源的短缺和环境治理成本的加大必会增加经济发展的社会成本，从而制约经济社会的高质量发展。

城市群地区城市用地扩张与生态环境保护交互作用的影响因素具有复杂性和多样性，除经济社会影响因素外，政策和规划对两者之间的胁迫和约束作用也会产生影响^[44]，诸如政策制度、产业结构升级、土地利用政策和城市规划等因素，但政策和规划影响强度存在难以量化的问题。因此，后续研究中应运用合适的模型综合考虑这些影响因素，进一步剖析城市群地区城市用地扩张与生态环境保护交互作用的影响因素。

(2)城市用地扩张对生态环境保护产生胁迫作用整体上呈现减弱的趋势，而城市群城市用地需求持续增加将继续对生态环境造成压力。因此，为了实现城市群城市用地扩张与生态环境保护二元共生发展，需要将生态文明融入城市群国土空间发展规划，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；构建多层次的土地集约利用体系，有利于促进生态型城市群发展，提高土地利用效益，为城市群高质量发展作出贡献；进一步剖析新时代背景下城市群城市用地扩张的生态环境影响机制，制定国土空间协同发展战略，加快中小城市的发展，促进城市群区域均衡发展；加强城市之间的生态共建环境共治，贯彻“山水林田湖草”生命共同体理念，促进经济绿色发展；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，逐步实现城市群国土空间高质量发展。

参考文献:

- [1]Fang C L,Yu D L.Urban agglomeration:An evolving concept of an emerging phenomenon[J].Landscape and Urban Planning,2017,162:126-136.
- [2]National Development and Reform Commission.The 13th Fiveyear Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China,2016-2020[M].Beijing:Central Compilation&Translation Press,2016.
- [3]Li T.Land use dynamics driven by rural industrialization and land finance in the peri-urban areas of China:“The examples of Jiangyin and Shunde” [J].Land Use Policy,2015,45:117-127.
- [4]Xu H,Wang X,Xiao G.A remote sensing and GIS integrated study on urbanization with its impact on arable lands:Fuqing City,Fujian Province,China[J].Land Degradation&Development,2000,11(4):301-314.
- [5]Fang C L,Wang Z B,Xu G.Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in China:A city-level perspective analysis[J].Journal of Geographical Sciences,2016,26(11):1519-1532.

-
- [6]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[J].中国科学:地球科学,2019,49(9):1413-1424.
- [7]甄江红,王亚丰,田圆圆,等.城市空间扩展的生态环境效应研究——以内蒙古呼和浩特市为例[J].地理研究,2019,38(5):1080-1091.
- [8]方创琳,蔺雪芹.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.
- [9]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(1):74-84.
- [10]方创琳,鲍超,申玉铭.水资源约束下西北干旱区城市扩张特征与变动趋势分析——以西陇海兰新经济带城市为例[J].自然资源学报,2004(2):248-256.
- [11]刘菁华,李伟峰,周伟奇,等.权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析[J].生态学报,2018,38(12):4341-4350.
- [12]邱思齐,岳文泽.刚性与弹性相结合的城市开发边界划定——以浙江省义乌市为例[J].应用生态学报,2018,29(5):1607-1616.
- [13]乔标,方创琳.城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J].生态学报,2005,25(11):3003-3009.
- [14]孙平军.1994—2011年江苏省城市化与生态环境非协调性耦合关系的判别[J].长江流域资源与环境,2014,23(8):1051-1056.
- [15]王新杰,薛东前.西安市城市化与生态环境协调发展模式演化分析[J].自然资源学报,2009,24(8):1378-1385.
- [16]刘耀彬,宋学锋.城市化与生态环境耦合模式及判别[J].地理科学,2005(4):26-32.
- [17]刘耀彬.区域城市化与生态环境耦合特征及机制——以江苏省为例[J].经济地理,2006,26(3):456-462.
- [18]梁龙武,王振波,方创琳,等.京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J].生态学报,2019,39(4):1212-1225.
- [19]欧阳晓,朱翔,贺清云.城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例[J].生态学报,2019,39(20):7502-7513.
- [20]欧阳晓,贺清云,朱翔.多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例[J].经济地理,2020,40(1):93-102.
- [21]Chen D,Lu X,Liu X et al.Measurement of the eco-environmental effects of urban sprawl:Theoretical mechanism and spatiotemporal differentiation[J].Ecological Indicators,2019,105:6-15.

-
- [22]Wang S J, Ma H, Zhao Y B. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment—A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45 (5):171-183.
- [23]Zhao Y B, Wang S J, Ge Y J, et al. The spatial differentiation of the coupling relationship between urbanization and the ecoenvironment in countries globally:A comprehensive assessment[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 360:313-327.
- [24]Ouyang X, Shao Q L, Zhu X, et al. Environmental regulation, economic growth and air pollution:Panel threshold analysis for OECD countries[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657:234-241.
- [25]Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 319(5864): 756-760.
- [26]Lou B, Ulgiati S. Identifying the environmental support and constraints to the Chinese economic growth—An application of the Emergy Accounting method[J]. *Energy Policy*, 2013, 55:217-233.
- [27]Liu N N, Liu C Z, Xia Y F, et al. Examining the coordination between urbanization and eco-environment using coupling and spatial analyses:A case study in China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93:1163-1175.
- [28]Yuan B L, Ren S G, Chen X H. Can environmental regulation promote the coordinated development of economy and environment in China' s manufacturing industry?A panel data analysis of 28 sub-sectors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149:11-24.
- [29]Yang W Y, Li T, Cao X S. Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form and transportation development on CO₂emissions from transportation in China:A panel data analysis of China' s provinces[J]. *Habitat International*, 2015, 49:212-220.
- [30]Tao Y, Li F, Wang R S, et al. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas:A study from Changzhou, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103:651-657.
- [31]Zhang W J, Xu H Z. Effects of land urbanization and land finance on carbon emissions:A panel data analysis for Chinese provinces[J]. *Land Use Policy*, 2017, 63:493-500.
- [32]Huang K N, Liu X P, Li X, et al. An improved artificial immune system for seeking the Pareto front of land-use allocation problem in large areas[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27 (5):922-946.
- [33]Wang S J, Fang C L, Wang Y, et al. Quantifying the relationship between urban development intensity and carbon dioxide emissions using a panel data analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 49:121-131.
- [34]Guo Y, Wang H, Nijkamp P, et al. Space-time changes in interdependent urban-environmental systems:A policy study on the Huai River Basin in China[J]. *Habitat International*, 2015, 45:135-146.
- [35]He J Q, Wang S J, Liu Y Y, et al. Examining the relationship between urbanization and the eco-environment using a coupling analysis:Case study of Shanghai, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77:185-193.

-
- [36]Du X J,Huang Z H.Ecological and environmental effects of land use change in rapid urbanization:The case of Hangzhou, China[J].Ecological Indicators,2017,81:243-251.
- [37]Liu Y,Yao C S,Wang G X,et al.An integrated sustainable development approach to modeling the eco-environmental effects from urbanization[J].Ecological Indicators,2011,11(6):1599-1608.
- [38]Liu Y B,Yao C S,Wang G X,et al.An integrated sustainable development approach to modeling the eco-environmental effects from urbanization[J].Ecological Indicators,2011,11(6):1599-1608.
- [39]Srinivasan V,Seto K C,Emerson R,et al.The impact of urbanization on water vulnerability:A coupled human-environment system approach for Chennai, India[J].Global Environmental Change,2013,23(1):229-239.
- [40]Sun X,Liu X S,Li F,et al.Comprehensive evaluation of different scale cities sustainable development for economy,society,and ecological infrastructure in China[J].Journal of Cleaner Production,2015,163:329-337.
- [41]Pissourios I A.An interdisciplinary study on indicators:A comparative review of quality-of-life, macroeconomic,environmental,welfare and sustainability indicators[J].Ecological Indicators,2013,34:420-427.
- [42]邓聚龙.灰色系统理论简介[J].内蒙古电力,1993(3):51-52.
- [43]何建兵.基于共生理论的小农户与新型农业经营主体互动发展关系研究[J].新余学院学报,2019,24(4):60-65.
- [44]方创琳.京津冀城市群协同发展的理论基础与规律性分析[J].地理科学进展,2017,36(1):15-24.