



中国环境科学
China Environmental Science
ISSN 1000-6923, CN 11-2201/X

《中国环境科学》网络首发论文

题目：人地关系视角下北京市“三生”空间转型及其碳储量效应
作者：帕茹克·吾斯曼江，艾东，冀正欣，段文凯，王楠，郝晋珉
DOI：10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231209.001
收稿日期：2023-09-11
网络首发日期：2023-12-09
引用格式：帕茹克·吾斯曼江，艾东，冀正欣，段文凯，王楠，郝晋珉. 人地关系视角下北京市“三生”空间转型及其碳储量效应[J/OL]. 中国环境科学.
<https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231209.001>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

人地关系视角下北京市“三生”空间转型及其碳储量效应

帕茹克·吾斯曼江^{1,2}, 艾东^{1,2}, 冀正欣^{1,2}, 段文凯³, 王楠⁴, 郝晋珉^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监测重点实验室, 北京 100193; 3. 中国农业大学图书馆, 北京 100193; 4. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

摘要: “三生”空间转型的碳储量效应及其空间分异特征是指导区域国土空间开发与生态环境保护的重要依据。基于人地关系理论, 运用动态度模型、变化轨迹方法探析了北京市“三生”空间分布格局和转型特征, 借助 InVEST 模型和生态环境质量贡献率揭示了北京市 1980~2020 碳储量时空分异特征和“三生”空间转型对碳储量的影响。结果表明: ①在人类文明发展阶段, 人类发展需求推动“三生”空间格局的演变, 人为诱导和自然转化两种转型方式呈现相互演替趋势; ②1980~2020 年北京市“三生”空间结构主要以生态空间为主, 农业生产空间呈持续减少趋势, 城镇生活空间则主要分布在主城六区; ③40 年间“三生”空间转型剧烈, 其中 2000~2010 年最为显著, 相比自然转化, 人为诱导引起的转型变化占有所有转型变化面积 92.68%; ④1980~2020 年北京市碳储量高值区域分布在生态涵养区, 农业生产空间和草地生态空间转向林地生态空间是碳储量增加的主要原因, 相反, 城镇和农村生活空间对生态空间的侵占是碳储量减少的主要原因。未来应调整并优化“三生”空间用地结构, 依据“三生”空间转型规律, 强化空间用途管制, 巩固提升区域固碳能力。

关键词: “三生”空间; 转型; 碳储量; 变化轨迹; 北京市

中共十八大明确提出“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的国土空间格局优化目标与原则, 确定了在实现土地资源合理配置、生态文明建设和可持续发展中生产、生活和生态 3 种空间 (简称“三生”空间) 的重要地位^[1]。“三生”空间既相互独立又相互制约, 任何空间比例的增大意味着其他空间比例的减少, 几十年来, 随着我国城镇化和工业化的快速推进, “三生”空间结构逐渐失衡, 国土开发无序、资源过度利用、生态环境恶化等问题日益突出。为应对全球气候问题和实现低碳可持续发展, 我国提出“碳达峰”、“碳中和”目标。陆地生态系统在在双碳目标行动中发挥“压舱石”和“稳定器”的作用^[2], 可显著抵消部分同期化石燃料和工业活动导致的碳排放, 因此“三生”空间的协调融合发展可以巩固和提升陆地生态系统碳汇增量, 是实现“双碳”目标的关键举措之一^[3]。

土地利用转型是土地系统科学的重点研究主题, 自 21 世纪初龙花楼等将土地利用转型概念引入中国以来^[4], 众多学者结合中国社会经济发展路径在土地利用转型的概念与理论、显性形态和隐性形态以及机制效应等方面相继开展研究^[5~8]。“三生”空间转型是土地利用转型理论在新时代国土空间研究中的进一步深化与应用, 是“国土空间-社会经济-生态环境”耦合系统的演化过程, 其实质是人地要素的互动反馈促进了“三生”空间的形成与演化^[9]。现阶段“三生”空间转型研究内容主要集中在功能内涵^[10,11]、识别划定^[12,13]、评价与优化^[14,15]、冲突与重构^[16,17]等方面。“三生”空间转型的生态环境效应尚处初步探索阶段, 多基于景观生态格局^[18,19]、生态环境质量^[20,21]、生态服务功能^[22,23]等方面, 但基于城市人地关系视角下对“三生”空间转型分类并讨论碳储量效应的研究较为鲜见。陆地生态系统作为重要的碳汇空间载体, 研究“三生”空间转型及其碳储量效应, 在优化国土空间开发保护格局、强化国土空间规划用途管控和落实双碳目标中发挥重要作用。

京津冀协同发展背景下, 北京市是推动实现绿色一体化的主战场。作为中国重要的政治、经济、文化中心, 在疏解非首都功能的同时, 满足未来高质量发展要求与国土空间规划“三线”

收稿日期: 2023-09-11

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAD06B01); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2021D01A82)

作者简介: 帕茹克·吾斯曼江, 男, 新疆伊犁人, 博士研究生, 研究方向为土地利用生态研究。E-mail: B20203210942@cau.edu.cn

通讯作者: 郝晋珉, 男, 山西太谷人, 教授, 研究方向为国土空间规划与区域可持续发展研究。E-mail: jmhao@cau.edu.cn

约束前提下, 应如何合理有效配置城市空间结构, 构建未来绿色低碳的城市发展模式? 鉴于此, 本文在人地关系视角下, 探析“三生”空间转型及其碳储量效应, 揭示空间内部与碳储量时空变化特征, 寻求碳汇潜力提升途径, 希冀为促进区域土地资源优化合理配置, 碳中和目标的早日实现提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 “三生”空间演变历程

在人类文明的不同发展阶段, 人的需求经历了从最基本的生存安全需求到追逐物质财富再到满足精神需求的转变, 受每种需求的牵引, “人地”之间相互作用, 推动空间格局的转型^[24]。在原始文明阶段, 人类敬畏并依附自然, 采集、渔猎等主要人类活动对自然环境禀赋条件依赖性高, 此时人的主观能动性较弱, 属于典型的原生空间形态^[25,26], 碳汇空间规模要远大于碳源空间; 受生活需求的推动, 农业文明社会人类生产和生活方式发生改变, 人类对“三生”空间的作用程度逐渐增强, 从环境中获取稳定资源的能力逐渐成熟, 由逐水草而居变为定居, 并出现了一定规模的农业生产空间, 但生态空间还是居主导地位; 工业文明时期, 先进的科学技术带来生产效率的提升, 人的主观能动性得到了极大释放, 人类需求向多元化需求发展, 衍生出多元复杂的人地关系, 受经济利益的驱动, 人类以牺牲农业生产空间与生态空间为代价, 积累了巨大的物质财富, 导致“三生”空间冲突和人地矛盾日益剧烈, 出现资源破坏、能源短缺、生态环境恶化等问题^[27], 进入到后工业文明时期, 人类被迫改变“征服者”的姿态, 重新审视生态保护与经济发展之间的关系, 开始注重生态保护, 减少人类破坏行为; 生态文明阶段是人类追求更美好生活的人地关系表达, 也是顺应全球可持续发展大势的必然趋势。根据环境库兹涅茨曲线假说, 生态环境质量会随着社会经济发展呈倒 U 形发展趋势^[28], 因此可通过技术进步、效率提升和合理规划等手段统筹把握“三生”空间比例关系, 构建一个生产集约高效、生活宜居适度、生态山清水秀的“三生”空间结构。

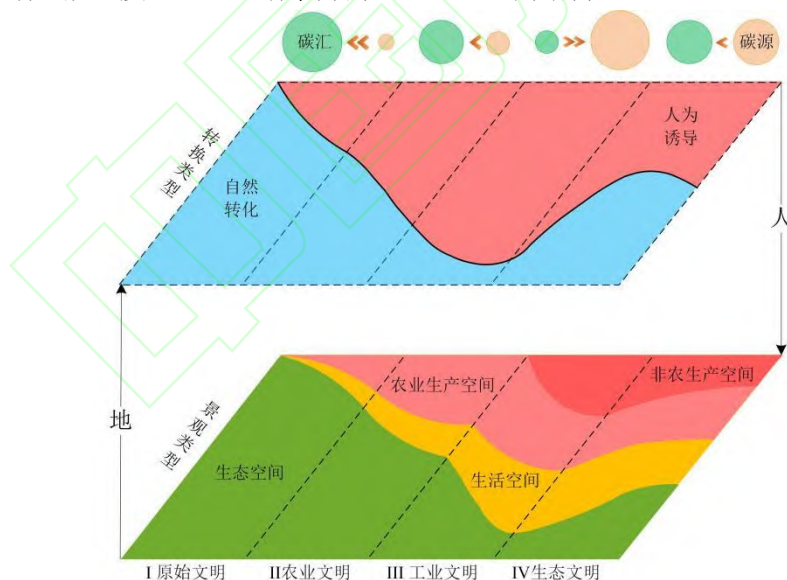


图 1 人地关系视角下不同人类文明阶段“三生”空间及其转换类型与碳源碳汇演变趋势

Fig. 1 Evolution trend of “production-living-ecological” space and its transformation, carbon source and carbon sink in different human civilization stages under the perspective of man-land relationship

1.2 “三生”空间转型分类

人地关系是指人类与自然环境之间互感互动的关系, 一方面反映了自然条件对人类生活的影响与作用, 另一方面表达了人类对自然现象的认识与把握, 以及人类活动对自然环境的顺应与抗衡^[29]。本文从人地关系理论角度出发, 通过变化轨迹分析方法识别“三生”空间转

型过程,将“三生”空间转型变化轨迹分为人为诱导和自然转化两种轨迹类别,人为诱导是指“三生”空间转型过程中受人类直接影响而发生的轨迹,受人口、社会经济发展以及规划政策等因素影响,自然转化则是指受生态系统内部规律自然发生的或受人类间接影响的轨迹^[30]。本文根据北京市“三生”空间历史演变轨迹特征,结合研究期内具体土地规划政策以及转型案例的基础上,构建“三生”空间转型分类表(表1),例如将退耕还林还草、百万亩造林、耕地撂荒、耕地“非农化”、砍伐林地和建设用地扩张等受人类直接影响的情形列为人为诱导转型类别;将草地退化等受半自然半人工或纯自然转化情形列为自然转化转型类别。

表1 “三生”空间转型分类表

Table 1 Classification table for transformation of “production-living-ecological” space

人为诱导	自然转化
AP→FE,GE,WE,UL,RL,IP,OE	-
FE→AP,GE,WE,UL,RL,IP,OE	FE→OE
GE→AP,WE,UL,RL,IP	GE→FE,OE
WE→AP,UL,RL,IP	WE→FE,GE,OE
UL→AP,FE,GE,WE,RL,IP,OE	-
RL→AP,FE,GE,WE,UL,IP,OE	-
IP→AP,FE,GE,WE,UL,RL,OE	-
OE→AP,WE,UL,RL,IP	OE→FE,GE

注:AP为农业生产空间,FE为林地生态空间,GE为草地生态空间,WE为水域生态空间,UL为城镇生活空间,RL为农村生活空间,IP为工矿生产空间,OE为其他生态空间。

1.3 研究区概况

北京市地处华北平原北部,地势西北高,东南低,西部、北部和东北部三面环山(图2),属暖温带半湿润半干旱季风气候。截至2020年底,全市常住人口为2189.3万人,共有16个市辖区,行政辖区总面积为16410 km²,首都功能核心区为西城区和东城区,生态涵养区包括门头沟、平谷、怀柔、密云、延庆、昌平和房山区;山地面积约占全市总面积的62%,平原面积约占38%;森林覆盖率为44.8%,森林蓄积量为2520.67万m³。作为“率先达峰城市联盟”的重点城市之一,要实现“双碳”目标,北京市不仅要做好碳排放的“减法”,更要做好生态碳汇的“加法”,严守资源安全底线,保障生态系统稳定性和服务能力,以促进绿色低碳高质量发展。

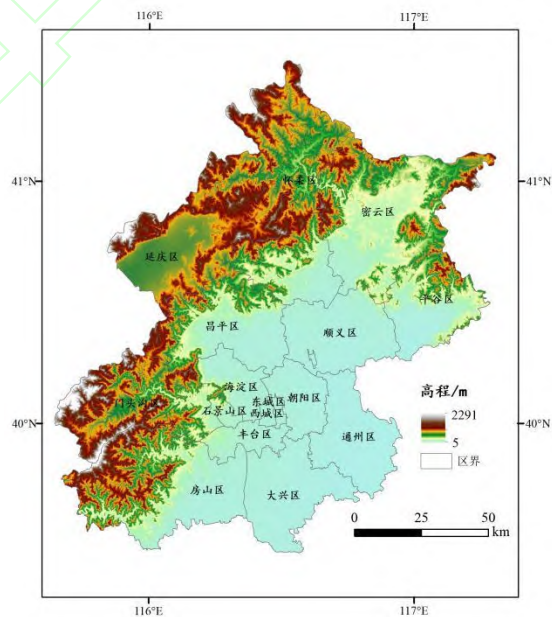


图 2 北京市地理位置示意

Fig. 2 Location of Beijing

1.4 数据来源

本文所采用的北京市土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 从中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC) 中选取分辨率为 30 m 的 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 5 期栅格数据作为主要数据源. 中国多时期土地利用遥感监测数据集的分类系统采用二级分类系统, 根据土地资源的自然属性和利用属性, 将一级分为 6 种类型, 二级分为 23 种类型, 经现场调查随机抽样和 Kappa 系数检验, 分类准确率均高于 90%^[31,32]. 土地是一个多功能自然综合体, 分主导功能和辅助功能^[33]. 本文利用土地利用主导功能来诠释不同“三生”空间类型, 例如耕地具有生产和供给粮食的生产功能, 同时又可以维持生态系统和提供生态服务, 在生活功能方面, 耕地具有休闲教育等功能. 但是从土地利用角度而言, 耕地的主要功能在于粮食生产即生产功能, 因此将耕地归为农业生产空间. 因此按照“三生”空间分类方法, 根据北京市自然地理格局, 结合《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》分类标准, 建立新的土地利用主导功能分类, 即 3 个一级和 8 个二级分类体系 (表 2). 参考《北京市统计年鉴》年均温、年均降水量数据修正碳密度.

表 2 “三生”空间结构与土地利用类型衔接表

Table 2 Corresponding table of "Production-Living-Ecological" space and land use type

土地利用主导功能分类		《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》的二级地类
一级地类 (代码)	二级地类 (代码)	
生产空间 (PS)	农业生产空间 (AP)	水田、旱地
	工矿生产空间 (IP)	工矿、交通建设用地
生活空间 (LS)	城镇生活空间 (UL)	县镇以上建成区用地
	农村生活空间 (RL)	独立于城镇以外的农村居民点用地
生态空间 (ES)	林地生态空间 (FE)	有林地、灌木林、疏林地和其他林地
	草地生态空间 (GE)	高、中和低覆盖度草地
	水域生态空间 (WE)	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂和滩地
	其他生态空间 (OE)	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质和其他未利用地

1.5 研究方法

1.5.1 “三生”空间动态度模型

在自然和人为因素影响下, 区域空间位置存在时空差异, 导致其不同“三生”空间类型的变化幅度和速度不同. 本文引入单一“三生”空间类型动态度和“三生”空间综合动态度. 单一“三生”空间类型动态度反映的是一定时间范围内, 研究区某一种“三生”空间类型面积变化的速率, 侧重于分析各“三生”空间类型的数量变化情况. 公式如下:

$$K = \frac{U_i - U_j}{U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式 (1) 中, K 为研究期内某类“三生”空间动态度, 即年变化率; U_i 和 U_j 分别为研究初期及末期某类“三生”空间的面积; T 为年限长度.

“三生”空间综合动态度描述的是整个研究区“三生”空间数量变化的总体速度, 可用于“三生”空间动态变化的区域空间差异研究. 公式如下:

$$LC = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, LC 为研究区“三生”空间综合动态度; LU_i 为研究初期第 i 类“三生”空间面积; ΔLU_{i-j} 为研究期内由第 i 类“三生”空间转化为第 j 类“三生”空间的面积的绝对值, n 为“三生”空间类型的数量; T 为 2 期间隔的时间。

1.5.2 “三生”空间变化轨迹分析

与传统土地利用转移矩阵方法对两期数据进行对比不同, 变化轨迹分析方法可以追溯 2 个及以上研究期连续或不连续转型变化过程^[34,35]. 引入该方法旨在描述“三生”空间转型变化规律和特征, 可根据每种“三生”空间类型每个像元时序变化来追踪和恢复转型轨迹. 变化轨迹代码中的数字或字母代表研究期内相应栅格对应的“三生”空间类型, 本文将采用数字作为轨迹代码 (1~8 分别表示: 农业生产空间、林地生态空间、草地生态空间、水域生态空间、城镇生活空间、农村生活空间、工矿生产空间和其它生态空间, 例如: 代码 11233 表示农业生产空间先向林地生态空间再向草地生态空间转型). 用公式表示为:

$$Y_x = (C_1)_x \times 10^{a-1} + (C_2)_x \times 10^{a-2} + \dots + (C_a)_x \times 10^{a-a} \quad (3)$$

式(3)中, Y_x 为研究时序内各栅格对应的变化轨迹代码, 代表具体转型过程; a 为研究时序内时间节点数; C_a 为第 a 个时间节点的土地利用栅格属性; 此公式适用前提为研究区“三生”空间类型数量 < 10.

1.5.3 “三生”空间碳储量计算

InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型以其成本低、评估精度高、参数获取灵活和生态系统服务功能评估结果的可视化表达等特点被广泛使用. 本文运用 InVEST 模型中 Carbon 模块计算“三生”空间碳储量, 该模块包括: 地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳. 碳储量计算公式为:

$$C_{totali} = \sum_{j=1}^n A_{ij} \times (C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{dj}) \quad (4)$$

式(4)中, C_{totali} 为区域 i 的总碳储量; A_{ij} 分别为区域 i “三生”空间类型 j 的面积; C_{aj} 、 C_{bj} 、 C_{sj} 和 C_{dj} 分别为“三生”空间类型 j 的地上地下生物碳密度、土壤碳密度和死亡有机物碳密度; n 为“三生”空间类型的数量.

考虑到碳密度地域差异性, 本文在已有土地利用碳密度数据基础上, 主要参考有关北京市碳密度研究成果^[36~39], 部分数据参考全国与北京同气候带地区的有关文献^[40~43]. 因碳密度值随土壤性质、降水和气温等因素的不同而不同, 故需对其进行修正. 年均气温和年均降水量与生物量的关系采用 Alam 等^[44]研究中的公式作为修正地上和地下生物量碳密度值的公式, 采用 Giardina 等^[45]和陈光水等^[46]研究中的修订方法用年均降水量因子修正土壤碳密度值, 以此最终构建北京市“三生”空间碳密度(表 3).

表 3 北京市“三生”空间碳密度 (t/hm²)

Table 3 The carbon density of “production-living-ecological” space in Beijing (t/hm²)

“三生”空间类型	植被地上碳密度	植被地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
----------	---------	---------	-------	----------

农业生产空间	12.49	2.56	29.51	1.06
林地生态空间	38.52	20.55	123.28	1.93
草地生态空间	18.75	16.27	49.25	19.65
水域生态空间	1.62	0.48	75.45	0.15
城镇生活空间	3.64	1.82	6.25	0
农村生活空间	3.78	1.99	6.48	0
工矿生产空间	3.58	1.78	6.25	0
其他生态空间	0.96	1.01	9.09	0.30

1.5.4 “三生”空间碳储量贡献率

本文借助生态环境质量贡献率计算方法^[47],通过构建碳储量贡献率指标,反映影响碳储量变化的主要“三生”空间转型类型.表达式为:

$$LEI = (LE_{t1} - LE_{t0})CA/LA \quad (5)$$

式(5)中, LEI 为“三生”空间转型的碳储量贡献率; LE_{t1} 和 LE_{t0} 研究期末期和初期“三生”空间碳密度; CA 为“三生”空间转型面积; LA 为总碳储量.

2 结果与分析

2.1 “三生”空间时空特征

依据北京市1980年、1990年、2000年、2010年和2020年“三生”空间现状数据,分析5个时点“三生”空间格局和结构演化特征(如图3和表4所示).结果表明:北京市1980~2020年“三生”空间结构以生态空间为主,占据研究区国土总面积的比例介于(53.41%~56.36%),生产空间次之(24.02%~36.82%),生活空间最少(7.89%~22.57%).

改革开放以来北京市人口规模扩大,经济发展迅速,城市化水平大幅提高,人地关系愈加复杂,“三生”空间结构发生了巨大的变化,其中生活空间和生产空间变化最为明显.由于城乡占地规模的不断扩大,1980~2020年城镇生活空间呈现“先加速后减速”扩展趋势,增加了103179.33 hm^2 ,增幅为221.38%,其中1980~2010年呈“摊大饼”式扩张,2010年城镇生活用地面积达到257602.86 hm^2 ,作为全国第一个减量发展的超大城市,2010~2020年北京市城镇生活空间减少107815.68 hm^2 ;农业生产空间面积持续降低,由1980年的590415.75 hm^2 锐减到2020年的366444.90 hm^2 ,减少了223970.85 hm^2 ,减幅为37.93%,相反,农村生活空间和工矿生产空间分别持续增加了89267.76 hm^2 和20568.96 hm^2 .林地和水域生态空间面积总体呈增加趋势,分别增加了17722.08 hm^2 和2104.11 hm^2 ;其他生态空间面积也有一定程度的增加,增加了1562.67 hm^2 .

按照“三生”空间二级分类空间,在研究期内,农业生产空间、林地生态空间和草地生态空间分布较为广泛,三者面积和比重介于75%~89%.受地形和水利条件的影响,农业生产空间重点分布在东部和东南部平原地区,小部分则在西北山地,相比其它区域,大兴、顺义、延庆和房山4个区农业生产空间较大,占全市农业生产空间面积的60%左右;林地生态空间呈“片状”主要分布在燕山山脉和太行山脉,怀柔、延庆、密云、房山和门头沟区地势较高,林地覆盖度较大;草地生态空间集中分布在房山、门头沟和怀柔等区;水域生态空间分布在密云、延庆、怀柔和平谷块状水库区域;城镇生活空间斑块具有较强连续性,呈“放射状”分布在首都功能核心区和城市功能扩展区;农村生活空间和工矿生产空间散点形态零星分布在研究区近郊和远郊区域,其他生态空间则零星分布在主城六区(东城、西城、海淀、丰台、朝阳和石景山区)外围.

表 4 北京市 1980~2020 年“三生”空间面积及变化 (hm²)

Table 4 Area changes of “production-living-ecological” space in Beijing from 1980 to 2020 (hm²)

年份/年	生产空间 (PS)		生活空间 (LS)		生态空间 (ES)			
	AP	IP	UL	RL	FE	GE	WE	OE
1980	590415.75	13729.05	46607.85	82823.40	730768.86	136005.12	40140.00	113.22
1990	585421.92	14901.39	48488.40	83460.96	731873.07	136556.10	39740.22	113.49
2000	491259.69	21059.82	103504.86	100068.12	743778.63	129626.73	51148.26	113.13
2010	379931.13	14094.99	257602.86	112696.74	732234.78	111319.11	32557.32	170.73
2020	366444.90	34298.01	149787.18	172091.16	748490.94	125523.45	42244.11	1675.89
1980~1990	-4993.83	1172.34	1880.55	637.56	1104.21	550.98	-399.78	0.27
1990~2000	-94162.23	6158.43	55016.46	16607.16	11905.56	-6929.37	11408.04	-0.36
2000~2010	-111328.60	-6964.83	154098.00	12628.62	-11543.85	-18307.62	-18590.94	57.60
2010~2020	-13486.23	20203.02	-107815.68	59394.42	16256.16	14204.34	9686.79	1505.16
1980~2020	-223970.90	20568.96	103179.33	89267.76	17722.08	-10481.67	2104.11	1562.67

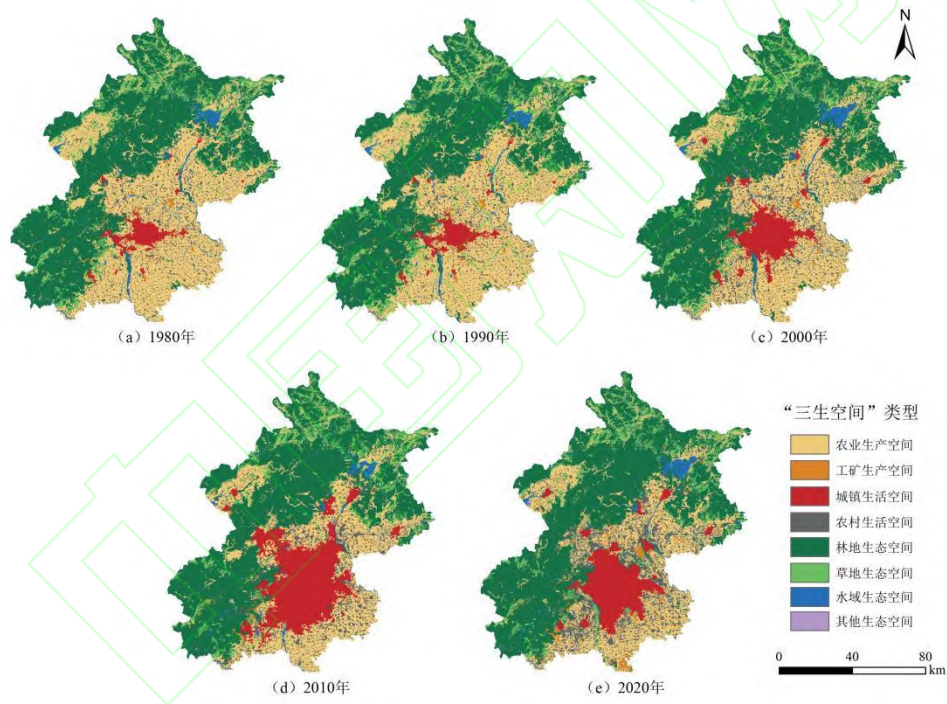


图 3 北京市 1980~2020 年“三生”空间格局

Fig. 3 The “production-living-ecological” space pattern in Beijing from 1980 to 2020

2.2 “三生”空间动态度

引入动态度模型可及时掌握“三生”空间动态信息,揭示其内部变化规律,为“三生”空间的规划、管理、保护和利用提供可靠依据。北京市 1980~2020 年各类“三生”空间动态度从高到低依次为:其他生态空间(34.51%)、城镇生活空间(5.53%)、工矿生产空间(3.75%)、农村生活空间(2.69%)、农业生产空间(-0.95%)、草地生态空间(-0.19%)、水域生态空间(0.13%)和林地生态空间(0.06%)。1980~1990 年所有“三生”空间类型变化较为平缓,动态度均为最小值。2000~2010 年农业生产空间、草地生态空间、水域生态空间和城镇生活空间变化较为剧烈,速率较快。

经测算得到北京市 5 个时段各区域“三生”空间综合动态度时空变化,利用 ArcGIS10.7 自然断点法将综合动态度水平分为:低、较低、中等、较高和高 5 个等级(图 5)。北京市 1980~2010 年 3 个时段内“三生”空间变化速度呈现增加趋势,综合动态度由 0.03%增加至 1.02%,表明社会经济活动对“三生”空间格局的影响较为剧烈,但自 2010 年开始出现转折,综合动态度逐渐下降,“三生”空间变化水平逐渐平稳由 1.02%降至 2020 年的 0.36%。从区域差异视角分析,不同区域“三生”空间综合动态度空间异质性较为明显,40 年间海淀区(1980~1990 年:4.13%)、朝阳区(2000~2010 年:3.90%)、丰台区(1980~2020 年:4.65%)和大兴区(2000~2010 年:4.33%)“三生”空间变化程度较为活跃;相反,西城区、东城区和门头沟区“三生”空间变化程度较为缓慢。综合来看,主城六区受人类活动影响较大,“三生”空间综合动态度处较高水平;受自然地理格局影响,生态涵养区土地利用开发程度较低,“三生”空间综合动态度处较低水平。

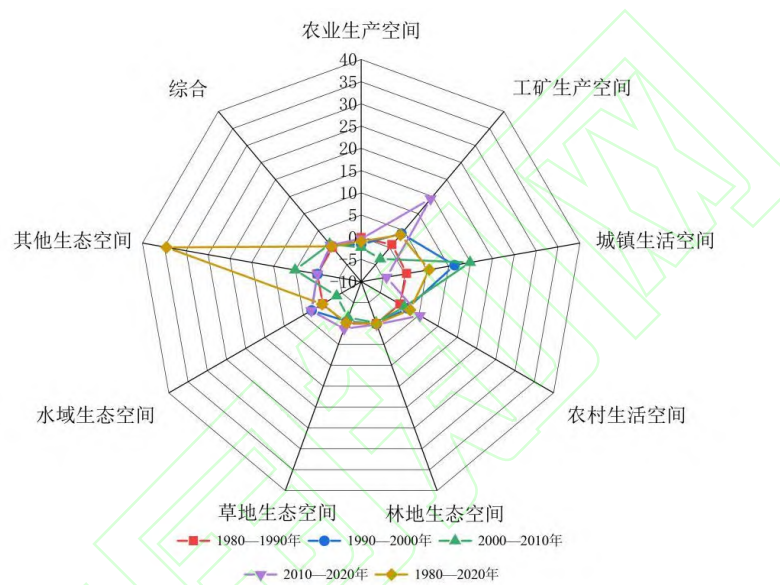


图 4 北京市“三生”空间动态度

Fig. 4 Dynamic degrees of “production-living-ecological” space in Beijing

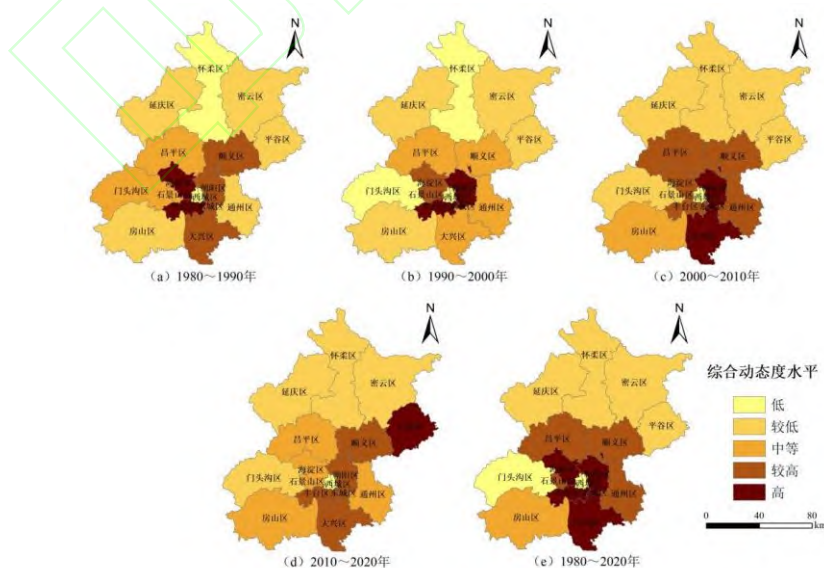


图 5 5 期各区“三生”空间综合动态度

Fig. 5 Synthetic dynamic degree of different district of “production-living-ecological” space in 5 periods

2.3 “三生”空间变化轨迹

基于北京市 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 5 期“三生”空间栅格数据,运用 ArcGIS10.7 中的栅格计算器工具对其进行变化轨迹分析.时间序列中包含 5 个时间点,理论上共存在 $8^5=32768$ 种变化轨迹代码,具有实质性变化轨迹 1964 种,通过对转型面积大小排序,在面积变化大于 100 hm^2 的变化轨迹选中取前 20 种轨迹代码,这 20 种轨迹代码的面积占有所有变化轨迹代码总面积的 86.5%,可代表北京市在研究时序内“三生”空间转型主要轨迹类型.

追溯每种“三生”空间转型变化历史轨迹,北京市 1980~2020 年各“三生”空间类型均有不同程度的转型变化,主要表现为农业生产空间、林地生态空间、草地生态空间和农村生活空间的转型变化(表 5).其中,农业生产空间共向城镇生活空间转出 72042.84 hm^2 ,占前 20 种主要轨迹代码总面积的 23.43%,其次为“11166”对应的变化轨迹,向农村生活空间转出 34912.62 hm^2 (11.36%),从空间分布来看,这 12 种农业生产空间转型变化主要发生在朝阳、海淀、丰台和大兴区(图 6).林地和草地生态空间转型对应的 5 种变化轨迹主要发生在昌平、延庆、怀柔、密云和平谷区,“22223”、“33322”和“33332”代码表现为林地和草地生态空间的相互转化,林地生态空间向所有其他“三生”空间类型转型变化中,向农业生产空间转出比率最大(代码:22211),为 3.82%;草地生态空间则共向林地生态空间共转移 19461.58 hm^2 ,转移比率为 6.33%.农村生活空间主要表现为向农业生产空间(代码:66611)和城镇生活空间转型(代码:66555 和 66655),空间变化位置主要在朝阳、顺义、通州和昌平区.

通过变化轨迹分析方法识别北京市“三生”空间人为诱导转型和自然转化转型过程中,不难发现,人类活动是引起北京市三生空间转型的重要原因,人为诱导转型起主导作用.具体表现在:在前 20 种变化轨迹代码中,除自然转化外(代码:33322 和 33332),因人为诱导发生转型变化面积占有所有转型变化总面积的 92.68%,其中较为明显的转型变化是:农业生产空间不断被侵占,用于城市建设和经济发展,其次,林地生态空间也被大面积占用为农业生产空间和农村生活空间.

表 5 北京市 1980~2020 年“三生”空间转型主要轨迹代码面积比例统计 (hm^2)

Table 5 Statistics on the main trajectory code area ratio of the “production-living-ecological” space transformation in Beijing from 1980 to 2020 (hm^2)

轨迹代码	栅格数量	面积	比例 (%)	轨迹代码	栅格数量	面积	比例 (%)
11112	158835	14295.15	4.65	11656	58572	5271.48	1.71
11116	161692	14552.28	4.73	11666	105536	9498.24	3.09
11117	102860	9257.40	3.01	22211	130377	11733.93	3.82
11122	122857	11057.13	3.60	22223	48620	4375.80	1.42
11155	394212	35479.08	11.54	22266	45629	4106.61	1.34
11156	279418	25147.62	8.18	33322	170384	15334.56	4.99
11157	50979	4588.11	1.49	33332	45858	4127.22	1.34
11166	387918	34912.62	11.36	66555	119319	10738.71	3.49
11222	48478	4363.02	1.41	66611	58918	5302.62	1.72
11555	406264	36563.76	11.89	66655	58862	5297.58	1.72

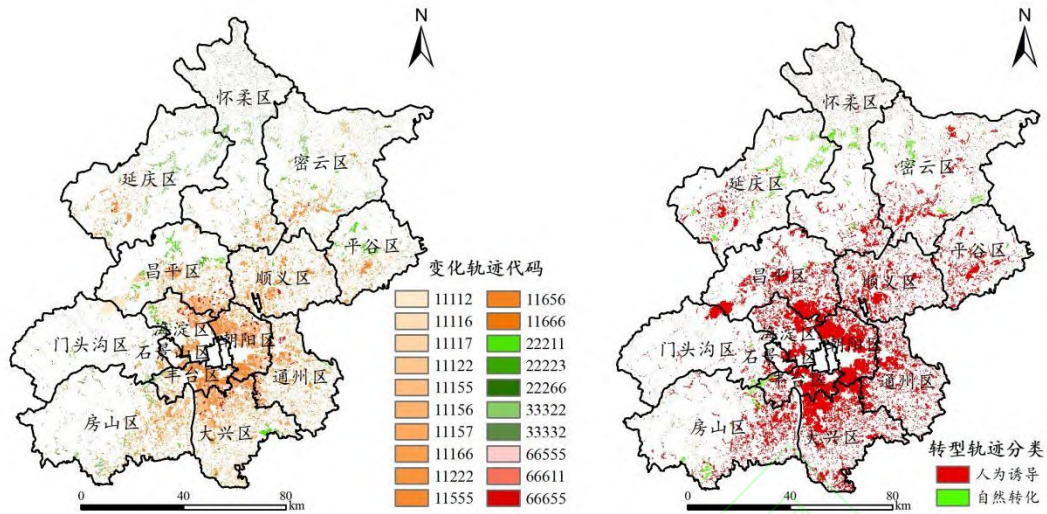


图 6 北京市 1980~2020 年“三生”空间转型主要轨迹代码与分类分布

Fig. 6 Code and classification distribution of the main trajectories of the “production-living-ecological” space transformation in Beijing from 1980 to 2020

2.4 “三生”空间转型的碳储量时空特征

从碳储量数值演变特征分析,北京市碳储量整体呈现逐期先增后减再回升的发展态势(表 6)。1980、1990、2000、2010 和 2020 年的碳储量分别为 180.57×10^6 、 180.62×10^6 、 179.59×10^6 、 170.93×10^6 和 175.25×10^6 t, 40 年间碳储量共计损失 5.32×10^6 t, 年均减少 0.13×10^6 t。其中林地生态空间承载着研究区重要碳汇空间,其碳储贡献率高达 75%; 其次为农业生产空间,占总碳储量的 15%,这是因为研究区多种植小麦和玉米等农作物,蕴含较高的地上和地下生物量,固碳能力较强所致。在 5 期碳储量变化中,2000~2010 年期间碳储量整体变化起伏较大,生态空间的侵占诱使碳储量损失较为严重,相反,2010~2020 年,依托于生态城市建设规划要求,北京市通过明确划定禁止建设地区、大力推进国土绿化高质量发展,提升了生态系统碳汇增量。另外,1980~2020 年各“三生”空间类型碳储量增减变化特征基本与单一“三生”空间类型动态特征保持一致,农业生产空间碳储量减少量和林地生态空间碳储增加量最大,分别为 10.22×10^6 t 和 3.26×10^6 t。

表 6 北京市 1980~2020 年“三生”空间碳储量结构变化 (t)

Table 6 Changes in the Carbon Storage Structure of the “production-living-ecological” Space in Beijing from 1980 to 2020 (t)

年份/年	生产空间 (PS)		生活空间 (LS)		生态空间 (ES)			
	AP	IP	UL	RL	FE	GE	WE	OE
1980	26.93	0.16	0.55	1.01	134.67	14.13	3.12	0.001
1990	26.71	0.17	0.57	1.02	134.87	14.19	3.09	0.001
2000	22.41	0.24	1.21	1.23	137.06	13.47	3.97	0.001
2010	17.33	0.16	3.02	1.38	134.94	11.57	2.53	0.002
2020	16.72	0.40	1.75	2.11	137.93	13.04	3.28	0.019
1980~1990	-0.23	0.01	0.02	0.01	0.20	0.06	-0.03	0.00
1990~2000	-4.30	0.07	0.64	0.21	2.19	-0.72	0.88	0.00
2000~2010	-5.08	-0.08	1.81	0.15	-2.12	-1.90	-1.44	0.001
2010~2020	-0.62	0.24	-1.27	0.73	2.99	1.47	0.75	0.017
1980~2020	-10.22	0.24	1.20	1.10	3.26	-1.09	0.16	0.018

从碳储量空间分布格局分析,碳储量损益程度受“三生”空间转型影响显著.1980~2020年北京市碳储量空间分布区域差异性明显,呈现出从城区向周边地区递增的空间态势(图7).就行政区而言,碳储量高值区域重点分布在研究区北部林草资源禀赋优越的延庆、怀柔 and 密云区,三者碳储量介于 $85.69\times 10^6\text{t}\sim 86.47\times 10^6\text{t}$;碳储量低值区域主要呈斑块状分布在主城六区地段,该区域地势较为平缓,重点开发区逐步扩张,碳汇潜力逐渐减弱,由 $6.50\times 10^6\text{t}$ 减少至 $4.72\times 10^6\text{t}$.而对功能区而言,生态涵养区作为重要的生态服务功能区,是城市的“大氧吧”和“后花园”,在首都碳汇空间布局中地位和作用极为重要,其碳储量占总量的88.78%以上,与此相比,首都功能核心区碳储量微乎其微,研究期内均小于 $0.11\times 10^6\text{t}$.

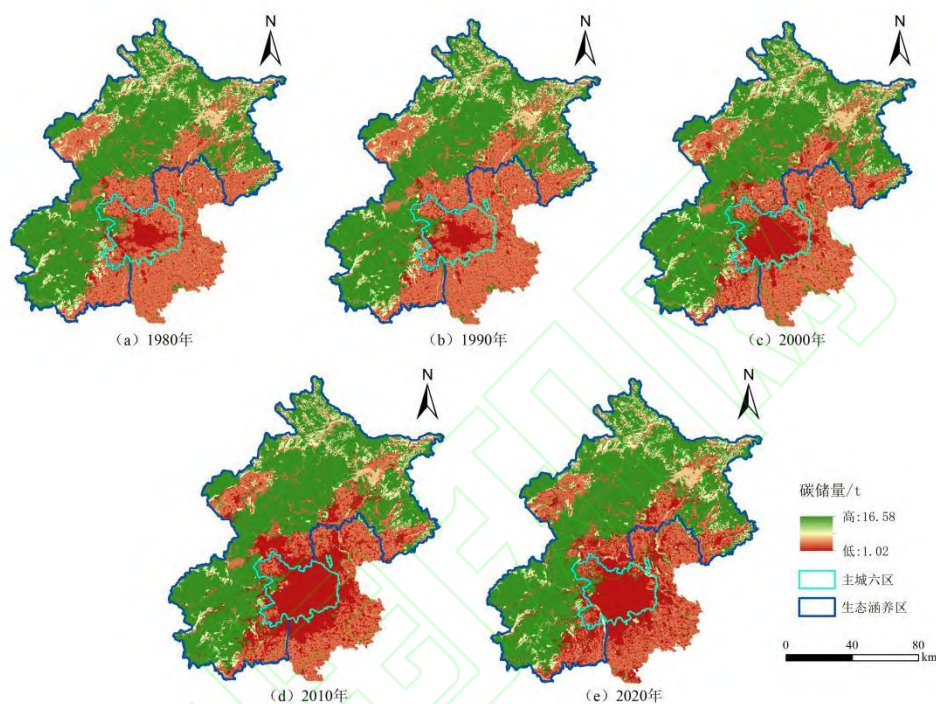


图7 北京市5期“三生”空间碳储量分布

Fig. 7 Carbon storage distribution of “production-living-ecological” space in 5 periods in Beijing

2.5 “三生”空间转型的碳储量贡献率

“三生”空间转型变化对人地系统碳储量的影响分为正效应与负效应,其中人类诱导和自然转化两种转型类型具有两重属性,二者转型变化过程既有固碳效应,又有失碳效应,在系统内部这两种效应可相互抵消,使碳储量总体上保持稳定,但数值的稳定并不意味着生态环境没有发生改变.北京市1980~2020年共有1964种转型变化轨迹,利用式(5)经过筛选得到各类“三生”空间转型引致的主要碳储量贡献值(图8).综合来看,研究期内农业生产空间与林地生态空间、林地生态空间与草地生态空间以及农业生产空间和草地生态空间的相互转化,主导了北京市碳储量的变化,转换贡献率总占比为75%.提升研究区碳汇功能的“三生”空间转型类型较为集中,农业生产空间转向林地生态空间和草地生态空间的正碳储量效应贡献值分别为6.942, 1.464,总贡献占比为38.51%,表明退耕还林还草政策的实施可显著提高研究区碳汇能力,其次,水域、草地和其他生态空间向林地生态空间的为研究区盈得 $4.693\times 10^6\text{t}$ 碳储量.在转型的碳储量负效应中,农业生产空间转向生活空间的贡献率最大,占负碳储量效应的39.54%,诱致碳储量损失 $2.427\times 10^6\text{t}$,说明侵占耕地建房等耕地非农化行为会导致碳储量减少.另外,受草地退化和耕地撂荒影响,农业生产空间和草地生态空间向其他生态空间转型引致的碳储量减少量仅占负碳储量效应的0.23%.

总体而言,1980~2020年北京市同时存在着生态碳汇潜力改善和减弱的两种趋势,碳汇

潜力改善的趋势大于碳汇潜力减弱的趋势,碳汇潜力改善的程度不断加大. 林地生态空间和农业生产空间的转入和转出是碳储量增减变化的重要因素. 相比自然转化转型变化, 人类诱导转型变化导致的碳储量变化量更大, 同时, 人类诱导转型变化导致的碳储量损失量大于其导致的碳储量增加量, 而自然转化转型变化则恰恰相反.

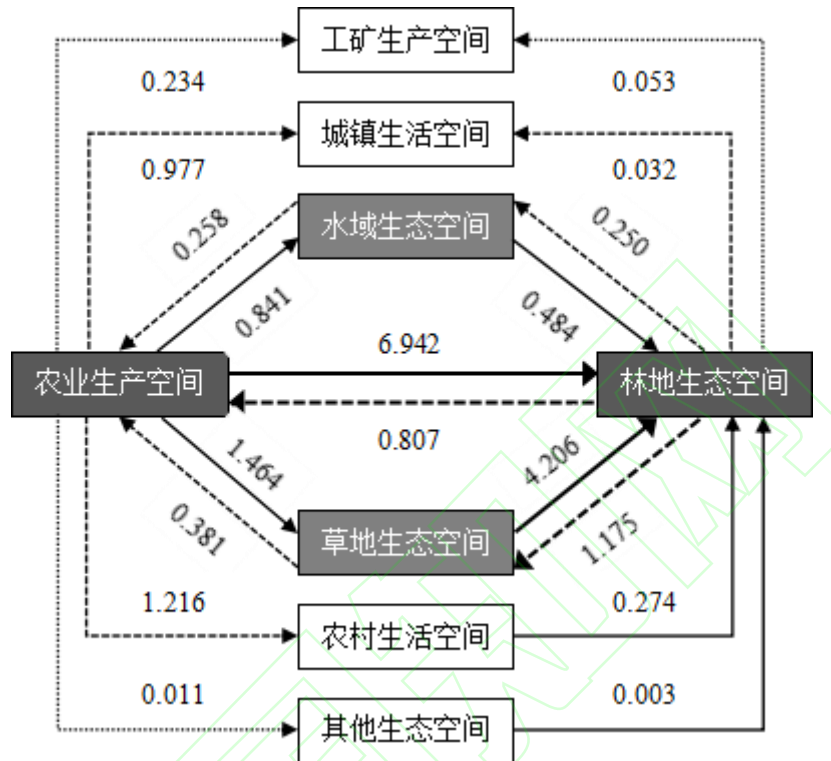


图 8 北京市 1980~2020 年“三生”空间碳储量贡献率

Fig. 8 Contribution rate of carbon storage in the “production-living-ecological” space of Beijing from 1980 to 2020

3 讨论

3.1 固碳能力提升途径

基于人地关系理论, 通过探析“三生”空间转型及其碳储量效应, 揭示“三生”空间格局演变过程, 统筹把握空间内在联系; 依据“三生”空间转型规律, 针对不同的空间类型制定相应的管制措施, 寻求固碳能力提升途径, 促进人地关系协调发展.

(1) 优先保护并扩大现有林地生态空间规模. 林地生态空间具有较强的碳抵消能力, 且碳汇潜力的改善主要来源于人为诱导下的林地生态空间的扩大, 即得益于北京市近年来坚持的百万亩造林计划, 但其仍然不足以弥补人为诱导下的碳损失量. 因此, 北京市可在规划约束条件基础上, 扩展人为诱导方式和模式, 持续推进造林计划增加林地空间规模, 提高林地生态空间提供的碳汇质量和总量.

(2) 提升农业生产空间固碳减排能力. 农业生产空间是北京市第二大碳汇空间, 碳减排潜力较为突出, 其碳储量主要包括农田植被和土壤有机碳库, 因此在保障粮食生产的前提下, 因地制宜的探索农业生产空间绿色低碳提升路径.

(3) 保障城镇生活空间减量提质、集约高效利用. 划定城镇开发边界, 坚守建设用地规模底线, 控制城镇及农村生活空间对农业生产空间和生态空间的挤占, 科学引导造林空间优先向城镇生活空间布局.

(4) 严格守护生态涵养区功能定位. 生态涵养区占全市面积的 68%, 其碳储量占总量的 88.78%, 是北京重要生态屏障和碳汇承载区, 也是区域协调发展的重要阵地, 更是首都探索碳中和路径的先行区, 因此应严格管控和守护生态涵养区功能定位, 为其生态保护绿色发展提供集约高效可持续的空间支撑.

3.2 不足与展望

本文在人地关系理论视角下, 结合变化轨迹分析结果, 根据人类对“三生”空间干预程度的高低, 将“三生”空间转型定性地分为人为诱导和自然转化两种类别, 可体现人为和自然因素对研究区“三生”空间转型及其碳储量效应的影响大小, 为未来指导区域制定适应生态文明目标的三区管制策略提供实践依据. 表 1 中的分类结果是通过转型案例以及相关规划政策等内容为依据构建, 北京市城市化水平较高, “三生”空间人为干预程度较大, 因此分类结果中人为诱导类转型方式较为集中, 但换作其他生态环境恶劣、人口较少和经济发展较为落后的区域, 分类结果可能不同, 比如因缺水、盐渍化等自然因素导致的耕地退化属自然转化类转型方式. 但该种分类方法存在一定的局限性, 在转型过程较为复杂的情况下, 该方法可能不适用, 即使变化轨迹结果相同, 如果经历了多步转型过程, 无法将其简单列为人为诱导和自然转化中的任何一类.

“三生”空间转型是一个动态且复杂的过程, 且随时可以在任何时候发生转型, 本文只跟踪了 1980~2020 年 5 期“三生”空间转型过程, 每期时间间隔为 10 年, 时间间隔的长短也可能导致空间转型及其碳储量变化趋势可能存在一定误差. 此外, 某种“三生”空间类型可能在计算前不久经历了转型过程, 影响了使用该“三生”空间真实碳密度, 致使碳储量效应可能被低估或高估了. 碳储量变化除了受“三生”空间转型外, 还受大气碳循环过程等因素的影响. 碳密度修正方法中目前还未有通过气温上升和土壤有机碳下降的关系表达, 目前无法确定其具体修正系数. 为了更好的了解区域“三生”空间转型与碳储量的互耦关系, 未来应该加强转型过程的参数化设计, 建立更加科学精准的碳汇计量方法, 为“双碳”目标提供技术支撑.

4 结论

(1) “三生”空间转型的实质是人地系统中人与地相互作用的结果, 本文在人地关系视角演绎了人类文明发展阶段人为诱导和自然转化两种转型方式. 这两种转型分类方法可以间接揭示人为诱导和自然转化对区域生态环境带来积极和消极影响. 相比自然转化, 北京市人为诱导转型导致的碳储损失量较为严重.

(2) 北京市“三生”空间分异特征显著, “三生”空间结构以林地生态空间、农业生产空间和草地生态空间为主, 其中农业生产空间规模持续减小; 主城六区城镇生活空间扩张显著且动态变化强烈, 但在 2010~2020 年得到缓和; 西城区、东城区和门头沟区“三生”空间变化程度最为缓慢.

(3) 1980~2020 年, 北京市“三生”空间转型剧烈, 相比自然转化, 人为诱导引起的转型变化占比较大, 占有转型变化总面积的 92.68%; 变化轨迹特征主要表现为农业生产空间、林地生态空间、草地生态空间和农村生活空间之间的相互转化.

(4) 北京市碳汇潜力改善和减弱趋势并存, 但改善趋势大于其减弱趋势. 40 年间共损失碳储量 5.32×10^6 t, 呈现出中心城区向周边地区递增的空间态势, 碳储量高值区域主要集中在生态涵养区, 低值区域主要分布在首都功能核心区. 农业生产空间转向林地和草地生态空间产生正的碳储量效应, 相反, 生活空间对农业生产空间的占用对碳储量有负效应.

参考文献:

- [1] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017,36(3): 378-391. [Huang J C, Lin H X, Qi X X. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 378-391.]
- [2] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测——以广东省为例[J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4827-4839.[Lin T, Yang M Z, Wu D F, et al.Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model-a case study in Guangdong province[J]. China Environmental Science,2022,42(10):4827-4839.]
- [3] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(07): 1419-1426.
- [4] 龙花楼. 土地利用转型——土地利用/覆被变化综合研究的新途径[J]. 地理与地理信息科学, 2003(01): 87-90.
- [5] 龙花楼. 论土地利用转型与土地资源管理[J]. 地理研究, 2015, 34(09): 1607-1618. [Long H L. Land use transition and land management [J]. Geographical Research, 2015, 34(09): 1607-1618.]
- [6] 宋小青. 论土地利用转型的研究框架[J]. 地理学报, 2017, 72(03): 471-487. [Song X Q. Discussion on land use transition research framework [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(03): 471-487.]
- [7] Long H L, Qu Y. Land use transitions and land management:a mutual feedback perspective [J]. Land use policy, 2018, 74: 111-120.
- [8] 刘永强, 龙花楼. 黄淮海平原农区土地利用转型及其动力机制[J]. 地理学报, 2016, 71(04): 666-679. [Liu Y Q, Long H L. Land use transitions and their dynamic mechanism in the Huang-Huai-Hai plain [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(04): 666-679.]
- [9] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应——以贵州省为例[J]. 中国土地科学, 2021, 35(11): 101-111. [Chen M J, Wang Q R, Bai Z R, et al. Transition of “production-living-ecological” space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutralization: a case study of Guizhou province [J]. China Land Science, 2021, 35(11): 101-111.]
- [10] 江曼琦, 刘勇. “三生”空间内涵与空间范围的辨析[J]. 城市发展研究, 2020, 27(04): 43-48+61. [Jiang M Q, Liu Y. Discussion on the concept definition and spatial boundary classification of “production-living-ecological” space [J]. Urban Development Studies, 2020, 27(04): 43-48+61.]
- [11] 徐磊, 王建鹏, 张贵军, 等. 环京津地区“三生”功能演化特征及分区调控研究[J]. 城市问题, 2022(10): 35-44. [Xu L, Wang J P,Zhang G J, et al. Functional evolution characteristics and zoning control of the “production-living-ecological” function of the region around Beijing and Tianjin [J]. Urban Problems, 2022(10): 35-44.]
- [12] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J]. 地理学报, 2016, 71(01): 49-65. [Li G D, Fang C L. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces[J]. Geographical Research, Geographical Research, 2016, 71(01): 49-65.]
- [13] 武子豪, 祖健, 史云扬, 等. 城市职能视角下“三生”空间的识别与评价——以京津冀城市群为例[J]. 资源科学, 2022, 44(11): 2247-2259. [Wu Z H, Zu J, Shi Y Y, et al. Identification and evaluation of “production-living-ecological” space from the perspective of urban function: taking the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration as an example [J]. Resources Science, 2022, 44(11): 2247-2259.]
- [14] 吴艳娟, 杨艳昭, 杨玲, 等. 基于“三生空间”的城市国土空间开发建设适宜性评价——以宁波市为例[J]. 资源科学, 2016,38(11):2072-2081. [Wu Y J, Yang Y Z, Yang L, et al. Land spatial development and suitability for city construction based on ecological-living-industrial space—take Ningbo city as an example [J]. Resources Science, 2016,38(11):2072-2081.]
- [15] Yang Y Y, Bao W K, Liu Y S. Coupling coordination analysis of rural production-living-ecological space in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Ecological Indicators, 2020, 117(4): 106512.
- [16] Xiao P N, Xu J, Zhao C. Conflict Identification and Zoning Optimization of “Production-Living-Ecological” Space [J]. International journal of environmental research and public health, 2022, 19(13): 7990.
- [17] 廖李红, 戴文远, 陈娟, 等. 平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1823-1833. [Liao L H, Dai W X, Chen J, et al. Spatial conflict between ecological-production-living spaces on Pingtan island during rapid urbanization [J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1823-1833.]
- [18] 陈斌, 徐尚昭, 周阳阳, 等. “三生空间”视角下宜昌市景观生态安全评价及其耦合特征分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(04): 344-351. [Chen B, Xu S Z, Zhou Y Y, et al. Evaluation and coupling coordination analysis of landscape ecological security of Yichang from the perspective of production-life-ecological space [J]. Research of soil and water conservation, 2022, 29(04): 344-351.]

- [19] 刘金花,丛中笑,王治军.基于三生空间转型的生态环境效应多尺度研究——以黄河流域山东段为例[J].中国环境科学,2023,43(05):2519-2530.[Liu J H, Cong Z X, Zhou Y Y. Ecological effects of production-living-ecological space transformation at multi-scales:a case study on the Shandong section of the Yellow River Basin [J]. China Environmental Science, 2023,43(05):2519-2530.]
- [20] 杨清可,段学军,王磊,等.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2018,38(01):97-106.[Yang Q K, Duan X J, Wang L, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects:a case study in the Yangtze river delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(01): 97-106.]
- [21] 帕茹克·吾斯曼江,郝晋珉,王楠,等.基于“三生”功能的土地利用转型及其生态环境效应——以尉犁县为例[J].干旱区地理,2021,44(06):1612-1622.[Paruke Wusimanjiang, Hao J M, Wang N, et al. Land use transformation based on production-living-ecological functions and associated eco-environment effects:a case study in Yuli county [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(06): 1612-1622.]
- [22] 戴文远,江方奇,黄万里,等.基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究——以福州新区为例[J].自然资源学报,2018,33(12):2098-2109.[Dai W Y, Jiang F Q, Huang W L, et al. Study on transition of land use function and ecosystem service value based on the conception of production,living and ecological space:a case study of the Fuzhou new area [J]. Journal of Nature Resources, 2018, 33(12): 2098-2109.]
- [23] 陈田田,彭立,王强.基于生态系统服务权衡的生态安全多情景决策[J].中国环境科学,2021,41(08):3956-3968.[Chen T T, Peng L, Wang Q. Scenario decision of ecological security based on the trade-off among ecosystem services [J]. China Environmental Science, 2021,41(08):3956-3968.]
- [24] 冀正欣,许月卿,卢龙辉,等.乡村聚落空间优化研究进展与展望[J].中国土地科学,2021,35(06):95-104.[Ji Z X, Xu Y Q, Lu L H, et al. Research progress and prospective for spatial optimization of rural settlements [J]. China Land Science, 2021, 35(06): 95-104.]
- [25] 李小云,杨宇,刘毅.中国人地关系的历史演变过程及影响机制[J].地理研究,2018,37(08):1495-1514.[Li X Y, Yang Y, Liu Y. The evolution process and its mechanism of man-land relationship in China [J]. Geographical Research, 2018, 37(08): 1495-1514.]
- [26] 郝晋珉.土地利用规划学[M].北京:中国农业大学出版社,2008.
- [27] 杨娟.人类文明发展视域下人与自然关系的历史演进[J].实事求是,2019,268(03):32-37.[Yang J. The historical evolution of the relationship between man and nature in the perspective of human civilization development[J]. Seek Truth from Facts, 2019, 268(03): 32-37.]
- [28] 彭红松,郭丽佳,章锦河,等.区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J].资源科学,2020,42(04):593-606.[Peng H S, Guo L J, Zhang J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource environmental pressure [J]. Resources Science, 2020, 42(04): 593-606.]
- [29] 刘彦随.现代人地关系与人地系统科学[J].地理科学,2020,40(08):1221-1234.[Liu Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(08): 1221-1234.]
- [30] Chang X Q, Xing Y Q, Wang J Q, et al. Effects of land use and cover change(LUCC) on terrestrial carbon stocks in China between 2000 and 2018 [J]. Resources,Conservation and Recycling, 2022, 182, 106333.
- [31] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics,patterns,and causes of land-use changes in China since the late 1980s [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 195-210.
- [32] Ning J, Liu J Y, Kuang W H, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5): 547-562.
- [33] 黄安,许月卿,郝晋珉,等.土地利用多功能性评价研究进展与展望[J].中国土地科学,2017,31(04):88-97.[Huang A, Xu Y Q, Hao J M, et al. Progress review on land use functions evaluation and its prospects [J]. China Land Science,, 2017, 31(04): 88-97.]
- [34] 王世东,冯正英,余洋,等.基于改进稳定映射法的土地利用/覆被变化轨迹分析[J].农业机械学报,2020,51(08):152-162.[Wang S D, Feng Z Y, Yu Y, et al. Land use/cover change trajectory analysis based on improved stable mapping method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(08): 152-162.]
- [35] 刘金雅,汪东川,孙然好,等.基于变化轨迹分析方法的生态用地流失空间关联研究[J].地理研究,2020,39(01):103-114.[Liu J Y, Wang D C, Sun R H, et al. Study on spatial relevance of ecological-land loss based on change trajectory analysis method [J].

Geographical Research, 2020, 39(01): 103-114.]

- [36] He C Y, Zhang D, Huang Q X, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 75, 44-58.
- [37] 孔祥斌, 胡莹洁, 李月, 等. 北京市耕地表层土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2307-2315. [Kong X B, Hu Y J, Li Y, et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon of cultivated land topsoil in Beijing [J]. Resources Science, 2019, 41(12): 2307-2315.]
- [38] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9456-9469. [Shao Z, Chen R, Zhao J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9456-9469.]
- [39] 郭旭东, 常青, 刘筱, 等. 基于碳储量视角的城镇土地利用模式与生态效益分异特征[J]. 中国土地科学, 2017, 31(04): 61-70. [Guo X D, Chang Q, Liu X, et al. Urban land use pattern and its ecological benefit from the perspective of carbon storage [J]. China Land Science, 2017, 31(04): 61-70.]
- [40] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响研究[J]. 生态学报, 2023(11): 1-15. [Ren Y M, Liu X P, Xu X C, et al. Multi-scenario simulation of land use and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023(11): 1-15.]
- [41] 周杰, 张学儒, 牟风云, 等. 基于CA-Markov的土壤有机碳储量空间格局重建研究——以泛长三角地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1565-1575. [Zhou J, Zhang X R, Mou F Y, et al. Spatial pattern reconstruction of soil organic carbon storage based on CA-Markov —— a case study in Pan-Yangtze river delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7): 1565-1575.]
- [42] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2003(1): 72-80.
- [43] 张平平, 李艳红, 殷浩然, 等. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1183-1197. [Zhang P P, Li Y H, Yin H R, et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1183-1197.]
- [44] Alam S A, Starr M, Clark B J F, et al. Tree biomass and soil organic carbon densities across the sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 67-76.
- [45] Giardina C P, Ryan M G, Hubbard R M, et al. Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(4): 1272-1279, doi:10.2136/sssaj2001.6541272x.
- [46] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配[J]. 生态学报, 2007(12): 5148-5157. [Chen G S, Yang Y S, Xie J S, et al. Total below ground carbon allocation in China's forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007(12): 5148-5157.]
- [47] 孔冬艳, 陈会广, 吴孔森. 中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1116-1135. [Kong D Y, Chen H G, Wu K S. The evolution of “production-living-ecological” space, eco-environment effects and its influencing factors in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1116-1135.]

The spatial transition of “production-living-ecological” space in Beijing and its effect on carbon storage under the perspective of human-land relation

PARUKE Wusimanjiang^{1,2}, AI Dong^{1,2}, JI Zheng-xin^{1,2}, DUAN Wen-kai³, WANG Nan⁴, HAO Jin-min^{1,2}
(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China; 3. Library, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 4. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The carbon storage effect and spatial differentiation characteristics of the spatial transformation of the "production-living-ecological" space is important basis for guiding regional land spatial development and ecological environment protection. Based on the theory of human land relationship, dynamic degree models and change trajectory methods were used to analyze the spatial distribution pattern and transformation characteristics

of the "production-living-ecological" space in Beijing, The InVEST model and the contribution rate of ecological environment quality were used to reveal the spatial-temporal differentiation characteristics of carbon storage in Beijing from 1980 to 2020, as well as the impact of the "production-living-ecological" space spatial transformation on carbon storage. The results indicate that: □ In the stage of human civilization development, human development needs drive the evolution of the spatial pattern of "production-living-ecological" space, and the two transformation methods of artificial induction and natural transformation present a trend of mutual succession; □ From 1980 to 2020, the spatial structure of the "production-living-ecological" space in Beijing mainly focused on ecological space, with agricultural production space showing a continuous decreasing trend, and urban living space mainly distributed in the six districts of the main city during the past 40 years, the spatial transformation of the "production-living-ecological" space has been intense, with the most significant period from 2000 to 2010. Compared to natural transformation, the transformation caused by human induction accounted for 92.68% of all transformation areas; □ From 1980 to 2020, the high value areas of carbon storage in Beijing were distributed in ecological conservation areas. The main reason for the increase of carbon storage was the shift of agricultural production space and grassland ecological space to woodland ecological space. On the contrary, the encroachment of urban and rural living space on ecological space was the main reason for the decrease of carbon storage. In the future, we should adjust and optimize the land use structure of "production-living-ecological" space, strengthen the control of space use according to the law of "production-living-ecological" space transformation, and consolidate and enhance the regional carbon sequestration capacity.

Key words: "production-living-ecological" space; transformation; carbon storage; change trajectory; Beijing

作者简介: 帕茹克·吾斯曼江(1992-),男,新疆伊犁人,博士四年级,研究方向为土地利用生态研究。 **E-mail:** B20203210942@cau.edu.cn 第一作者发表论文 3 篇。