

超大城市人口—自然资源系统 可持续发展水平研究 ——基于 Laplace 混合政策模拟

曾雪婷, 薛 勇

(首都经济贸易大学 劳动经济学院, 北京 100070)

摘 要: 人口增长与集聚为超大城市的发展提供动力, 也给其自然资源系统带来极大扰动, 使之呈现脆弱性特征; 为实现超大城市人口—自然资源可持续发展, 近年来政府实施了大量调控政策, 但因对城市人口—自然资源系统的复杂互动难以精确量化, 导致超大城市人口与自然资源关系治理困难重重。基于此, 以北京市为例构建人口—自然资源系统可持续性评价框架, 从政策干预视角, 分析不同类型调控政策(如人口调控、技术改进、资源管制等)与人口、自然资源的因果关系, 并利用 Laplace 准则结合决策者风险喜好, 模拟混合政策干预对人口—自然资源系统可持续性带来的影响。结果显示: 政策干预是保证北京市人口—自然资源系统可持续发展的重要手段, 其中, 人口调控政策是北京市人口—自然资源系统可持续性变动的主要影响因素, 资源管制和技术改进是次要影响因素; 随着政策干预强度的增加, 由于人口系统安全性和自然资源系统脆弱性的互动博弈, 北京市人口—自然资源可持续性逐渐趋于稳定; 在 Laplace 情景下, 人口安全性减弱了 1.82%, 损失不大; 而自然资源脆弱性减弱了 12.13%, 收益较高; 最终使得人口—自然资源系统可持续性增强了 6.23%。因此, 对于超大城市的政策干预需要综合考虑人口安全性以及自然资源脆弱性, 不能顾此失彼, 从而最大化人口—自然资源系统收益。

关键词: 政策干预; 人口—自然资源系统; 可持续性; 混合政策模拟; Laplace 准则

中图分类号: C922 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4149 (2022) 01-0121-19

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4149.2021.00.055

收稿日期: 2021-03-18; 修订日期: 2021-09-30

基金项目: 北京市哲学社会科学基金重大项目“新时代北京人口调控与城市可持续发展”(18ZDA06)。

作者简介: 曾雪婷, 工学博士, 首都经济贸易大学劳动经济学院教授, 博士生导师; 薛勇, 首都经济贸易大学劳动经济学院博士研究生。

一、引言

超大城市的人口集聚与自然资源的矛盾越来越为人们关注。作为超大城市的代表，北京处于京津冀城市群的核心区域，其高城市化程度、高社会资源（教育、文化、医疗等）占有度、高政治资源保障度使得人口高度集聚^[1-3]。一方面，人口增长和集聚为北京市的发展提供了动力^[4]，高出生率、外来人口大量流入、年龄结构合理、高人口红利等保证了城市人口安全，也为城市发展提供了基础的劳动力资源和消费需求，使得城市充满活力，整体处于上升期^[5-6]；同时也缓解了人口增长停滞、性别比失衡、老龄化等人口问题^[7-8]。但另一方面，人口过度聚集也易引发自然资源短缺。其不仅体现为人口总体规模超过自然资源总承载力，还体现在局部自然资源过度消耗导致的资源“结构性、局部性”短缺等问题^[9-11]。早在 19 世纪 40 年代，洛伊（Lloyd）指出有限的土地资源不能满足人口的无限增长和集聚^[12]，随后哈丁（Hardin）从更多维度讨论了局部地区自然资源稀缺与人口增长之间的矛盾^[13]。我国学者对相关问题的研究起步较晚，20 世纪 80 年代关于人口—资源系统的研究才开始大量出现^[14-15]。20 世纪 90 年代后期，随着社会的发展，人们逐渐意识到资源环境可持续发展的重要性，学者们开始从定性和定量角度对人口、资源与环境协调发展关系进行研究^[16-17]。进入 21 世纪以来，随着人口与自然资源之间的矛盾愈加凸显，越来越多的学者开始聚焦区域“人口—经济社会—资源环境”复合生态系统的协调发展^[18-19]。学界的研究促进了政府宏观政策的制定，党的十九大报告明确指出：“坚持人与自然和谐共生作为新时代坚持和发展中国特色社会主义的基本方略^[20]。”北京市“十四五”规划同样提出：“人口资源环境矛盾依然突出，疏解非首都功能、治理大城市病任重道远。”政府的重视又进一步促进了学界对相关问题的研究。

而要解决这一问题，可以通过公共管理、政策调控、城市空间规划等方法来实现^[21-24]。例如，部分学者从控制人口的角度建议提高北京的准入门槛，通过严格户籍制度、提高房价等方式控制人口迁入，减缓人口规模的增长^[25-26]；还有部分学者从自然资源的角度提出应当科学规划城市发展空间，建立规范有序的城市空间秩序，并通过积极植树造林、完善环境基础设施、加强污染治理，从而减少环境破坏，提高城市自然资源系统的承载力^[27-28]。在对人口—自然资源可持续性的研究中，有学者使用生态足迹模型对自然资源可持续性进行评估，提出基于人口的生态足迹强度、城市化率、生态承载力是引起区域间自然资源可持续性差异的主要原因^[29]。还有学者利用相对资源承载力模型对人口与资源的相对承载力进行评价，指出相比社会、经济等资源，自然资源对资源综合承载力的贡献最大^[30]。也有学者基于 DPSIRM 模型，对自然资源承载力进行分析^[31]。但是现有人口、自然资源的研究要么仅从城市发展视角讨论人口安全，将人口安全视为城市发展的附属条件^[32]，要么将人口—资源—环境视为一个复合系统，将人口变动视为改变复合系统稳定性的驱动力^[33-34]，而忽略了人口改变对人口系统安全性的影响。另外，在进行政策干预对系统影响的研究时，常见的方法包括：①通过系统动力学进行仿真模拟^[35-36]；②通过构建评价模型对政策进行量化，将结果代入回归模型进而对其影响进行分析^[37-38]；③利用 CGE 模型构建政策成本与政策收益之间的关系，进而对政策效果进行模拟分析^[39]。但现有研究往往忽略了政策干预之间的

交互性, 导致研究结论放大或缩小了政策干预的效果。目前, 北京不仅通过宏观规划 (如非首都功能疏解、规划城市副中心、京津冀协同发展等) 来提升、恢复区域自然资源系统的本源功能, 更出台了大量的调控政策 (包括人口疏解、水资源节约、增加环保投资、市场准入、土地资源开发规范等), 力求缓解北京市人口—自然资源之间的矛盾。然而大量政府干预政策对人口—自然资源可持续性的影响效果, 以及政府干预政策之间的交互作用却难以衡量, 因此, 需要通过混合政策模拟进行量化分析, 从而给决策者提供可参考的依据。

二、研究思路和框架

图 1 展示了本文的研究框架。随着城市化进程的推进, 人口不断向城市转移, 人口规模增加所形成的规模效应, 使得大城市拥有更全更好的服务, 这进一步促进了人口向大城市聚集^[40]。但人口的迅速膨胀会增加自然资源承受的压力, 自然资源作为人类生存的载体, 其承载力、韧性和恢复能力决定了其所能承受的人口上限^[41]。而当人口的增加超过一定界限

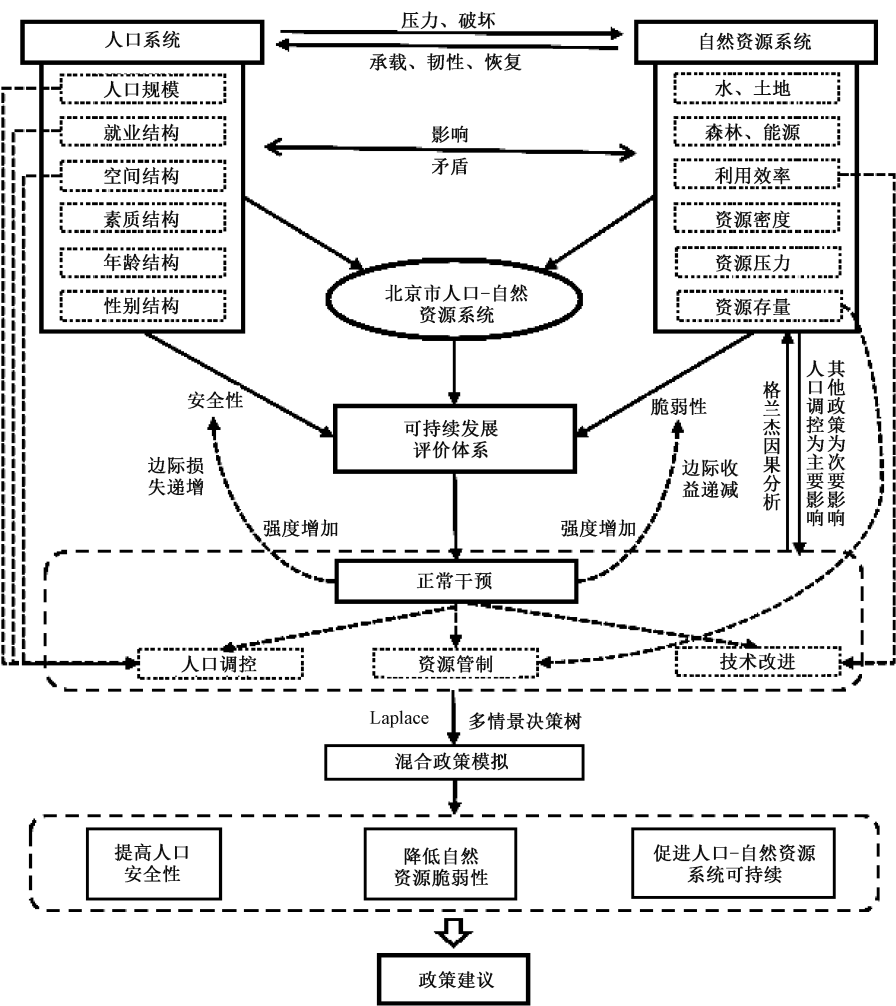


图 1 研究框架

后，自然资源会出现不同程度的短缺，人类对自然资源的无序开发和过度使用会对自然资源造成不可逆的破坏^[42]。目前，北京市人口与自然资源之间的矛盾和冲突日益激烈，通过将人口系统与自然资源系统相耦合，充分考虑二者之间的关系，既考虑人口安全，又关注自然资源脆弱性，可以避免在进行政策规划时顾此失彼。

首先，本文构建北京市人口—自然资源可持续性评价系统（包含人口安全性和自然资源脆弱性两个子评价系统），通过分析人口安全性与自然资源脆弱性的互动博弈以获得北京市人口—自然资源系统可持续性的变动趋势。其次，从政策干预视角入手，并结合效用分析理论，分析人口安全性和自然资源脆弱性与政策干预之间的边际效益关系。再次，通过格兰杰因果检验分析不同类型政策（如人口调控、资源管制和技术改进）与人口—自然资源系统各要素间的因果关系。最后，将决策者风险喜好纳入混合政策模拟中（包含单独政策及混合政策），利用 Laplace 准则完善情景决策过程，对北京人口—自然资源系统可持续性进行模拟分析，以探究混合调控政策对北京市人口—自然资源系统可持续性产生的作用和反馈机制，并提出切实有效的政策建议。

三、北京市人口—自然资源系统可持续发展评价框架

1. 基于系统动力学的人口—自然资源系统互动性分析

图 2 展示了政策干预下人口—自然资源系统可持续性互动反馈回路图。回路图反映了北京市政策干预与人口—自然资源系统可持续性之间的互动关系。其中，政策干预通过对人口系统安全性和自然资源系统脆弱性造成影响，从而改变人口—自然资源系统可持续性，是人口—自然资源系统持续性变动的驱动力。而人口系统和自然资源系统之间也具有交互性，人口系统中人口规模和人口结构的改变，会对自然资源承受的压力、资源的分布以及资源密度造成影响，进而改变自然资源脆弱性；反过来，各种自然资源的分布、密度也会影响人口结构以及人口规

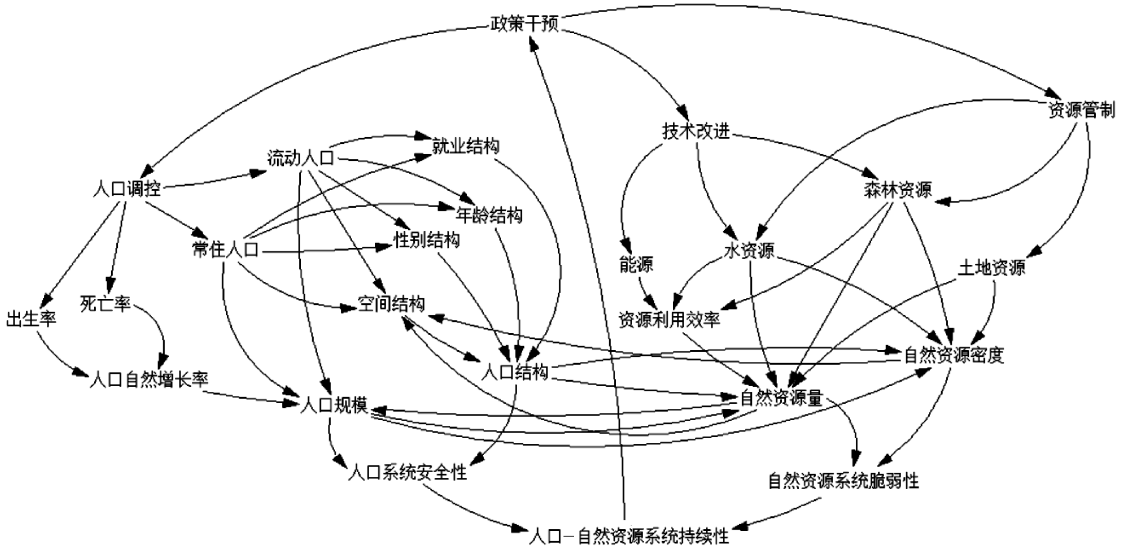


图 2 政策干预下人口—自然资源系统可持续性互动反馈回路图

模。而整体来看,政策干预通过影响人口—自然资源系统的组成要素来影响其持续性,而人口—自然资源系统可持续性的改变也会影响政府干预政策的制定,形成回路。

2. 评价模型

尽管利用系统动力学可以较直观和便捷地反映政策干预与人口—自然资源系统持续的互动反馈关系,但在对人口—自然资源系统持续进行量化分析和系统性评价时,由于系统动力学在构建影响回路时各变量是用公式进行计算和定义的,无法像极差法那样体现变量的变动速率,因此在对持续性进行评价时稍显不足。而目前,学者们在对系统某一性质(如脆弱性、持续性等)进行评价时,大多通过构建评价模型,挑选指标并对指标进行处理和赋权,从而进行横向或纵向评价。因此,本文也选择通过构建人口—自然资源系统可持续性评价模型对北京市人口—自然资源系统可持续性进行量化研究。同时,在针对自然资源可持续性的研究中,人口因素通常为关键因素,人口的数量、分布、结构等往往会对自然资源的可持续利用造成显著影响^[43-46]。考虑到人口的变动不仅对人口系统本身造成影响,也对自然资源系统造成影响,人口—自然资源系统的可持续发展既要求人口安全性高,也需要自然资源系统脆弱性低,因此,将人口系统和自然资源系统合并为人口—自然资源系统,并构建指标体系来进行综合评价。

而在构建可持续性评价体系时,尽管高人口安全性和低自然资源脆弱性是北京市人口—自然资源系统可持续发展的前提保证和内在要求,但二者既相互联系,又存在一定相悖性。首先,二者均为人口—自然资源系统的重要组成部分,共同支撑人口—自然资源系统可持续发展,合理的人口规模、年龄结构、素质结构有助于城市自然资源的可持续利用^[47],而充足的自然资源是人类生存和发展的必要条件。其次,人口安全性对人口增长的内在要求加重了自然资源面临的压力,加剧了自然资源脆弱性。例如,2020年北京市常住人口出生率为6.98‰,自然增长率为2.39‰^①,处于超低生育水平,而65岁以上老龄人口占比为13.5%,属于老龄化社会^②,为了保障城市人口安全,需要提高人口出生率以及吸引大量年轻人的迁入以改善人口结构,然而这必然会导致人口的增加,在现有自然资源供不应求的背景下,随着人口增加,自然资源的脆弱性会进一步提高。因此,为解决在实现北京市人口—自然资源系统可持续发展目标过程中,人口安全性与自然资源脆弱性既相互联系又相悖离的矛盾,本文构建特大城市人口—自然资源系统可持续性评价模型,采用综合评价法,分别对城市人口安全性和自然资源脆弱性各要素加权求和,得到城市人口安全性和城市自然资源脆弱性结果,并将二者相耦合,最终得到如下综合模型:

$$SUS = 1/2[SAF + (1 - VI)] \quad (1)$$

其中, SUS 代表人口—自然资源系统可持续性, SAF 代表人口安全性, VI 代表自然资源脆弱性。城市人口安全性是指一个国家或地区的人口规模是否适度、人口结构是否合理、人口流动是否有序的状态^[48-49]。而城市自然资源脆弱性则是指城市自然资源系统受破坏或伤

① 数据来源: <http://nj.tj.beijing.gov.cn/nj/main/2021-tjnj/zk/indexch.htm>

② 联合国1956年出台文件《人口老龄化及其社会经济后果》,制定了老龄化社会的新标准,具体为65岁以上老年人口占总人口的7%,则将该地区视为进入老龄化社会。按照这一标准,北京市于1995年进入老龄化社会。

害的程度，取决于其暴露性、敏感性和适应性^[50-51]。其中暴露性（*EI*）是指自然资源与压力和扰动接近的程度，敏感性（*SI*）是指暴露单位受压力和扰动影响而改变的容易程度，适应性（*AI*）是指暴露单位处理不利影响并从中恢复的能力^[52-53]。根据脆弱性与其构成要素的关系，自然资源脆弱性（*VI*）的计算模型如下：

$$VI = EI + SI - AI$$

(2)

而人口安全性，自然资源系统的暴露性、敏感性和适应性均可通过加权求和的方式计算得到，具体计算公式如下：

$$P_r = \sum_{n=1}^m x_{ij}w_j$$

(3)

其中，*P_r* 代表领域层下的第 *r* 个指标，*x_{ij}* 则为该领域层下利用极差法进行标准化后的某一具体指标，*w_j* 为根据熵值法计算出的该指标权重。将公式（2）、（3）分别代入公式（1）后，可以得到如下整体模型：

$$SUS = 1/2 \left[\sum_{n=1}^8 x_{ij}w_j + \left(1 - \sum_{n=1}^4 x_{ij}w_j + \sum_{n=1}^5 x_{ij}w_j - \sum_{n=1}^4 x_{ij}w_j \right) \right]$$

(4)

3. 指标体系构建

表 1 展示了北京市人口—自然资源系统可持续性指标体系。如前所述，人口—自然资源可持续性由人口安全性和自然资源脆弱性共同构成。在有关人口安全性的研究中，一方面学者们主要对人口安全本身进行研究和讨论，指出人口安全是人口发展状态的一种衡量，而人口数量、人口结构、人口素质、生育水平、年龄结构、人口分布等因素是人口安全的重要组成要素^[54-56]。另一方面则是将人口安全视为系统的组成部分，例如从城市发展的角度来看，人口安全（包括人口规模适度、人口素质不断提高、人口结构合理等）是城市持续、稳定发展的必要条件^[57-58]。但是，不管从何种视角来研究人口安全，均主要通过构建指标体系来进行衡量和评价。因此，在人口安全性指标选取中，参考现有研究，本文选择一个地区的人口规模、性

表 1 北京市人口—自然资源系统可持续性指标体系			
领域层	准则层	指标层	权重
安全性	人口规模	常住人口规模	0.084
		流动人口规模	0.064
	人口结构	常住人口自然增长率	0.039
		就业结构	0.024
		性别结构	0.042
		素质结构	0.033
		年龄结构	0.047
		空间结构	0.062
脆弱性	暴露性	建筑面积占比	0.054
		能源产耗比	0.037
		水资源总量	0.045
		森林覆盖率	0.041
	敏感性	土地利用效率	0.035
		能源利用效率	0.075
		水资源短缺率	0.034
		人均水资源量	0.038
	适应性	人均林地面积	0.049
		水土流失治理面积	0.051
		环保支出	0.046
		污水处理率	0.035
		人均绿化缺口	0.066

注：暴露性指地区与压力和扰动接近的程度，敏感性指地区受压力和扰动影响而改变的容易程度，适应性指地区处理不利影响并从中恢复的能力。

别结构、人口自然增长率、就业结构、素质结构、年龄结构以及空间结构等作为评价指标。在自然资源脆弱性指标选取中，参考已有研究并考虑到指标的可获取性，首先汇总了可能涉及到的 45 个指标，利用主成分分析法对指标进行初步分析，提取影响度较大的指标，并结

合专家的建议对指标进行二次筛选, 最终选取了相关度较高的 13 个指标。本文所用数据主要来源于历年《北京统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《北京区域统计年鉴》、《中国林业年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》, 对于个别缺失数据, 则根据插值法进行补充。

其中, ①就业结构是第一、二、三产业劳动力占比的加权结果, 第二产业劳动力占比越高, 对城市自然资源系统的压力就越大, 因此给予最高的权重, 第三产业其次, 第一产业权重最低。②一般来说社会的总人口性别比, 也就是全社会男性人口和女性人口的比例, 在 105 位男性对 100 位女性的比例情况下是比较合理的, 所以性别结构采用了“男性/女性-1.05”的计算方式。③在素质结构的计算中, 用初等教育代表小学及以下学历, 中等教育代表初中、高中及中职学历, 高等教育代表高职、本科、硕士及以上学历, 并且由于学历越高, 城市人口整体素质越高, 因此给予较高学历更大的权重。④由于健康的年龄结构是中间大、两头小的梭型, 因此给予 15—59 岁的适龄劳动人口最高的权重, 并且由于社会中年轻人占比较高更有利于人口系统的安全, 因此给予适龄劳动人口更高的权重。⑤空间结构则用城六区人口密度/其他城区人口密度来代表, 空间结构越低, 代表人口分布越均匀, 人口系统的安全性越高。

四、模型结果与因果辨析

1. 模型结果变动趋势分析

图 3 展示了北京市人口—自然资源系统可持续性的变动趋势。可以看到, 在 2015 年之前, 可持续性总体呈现先增强后减弱的趋势; 而在 2015 年之后, 可持续性先增强, 随后又减弱并趋于平稳。通过对北京市人口—自然资源数据进行分析发现: 2015 年之前, 北京市常住人口保持着年均 35 万人左右的增长规模, 流动人口保持年均 20 万左右的增长规模; 而在 2015 年之后, 常住人口维持在 2170 万左右, 并于 2017 年开始逐年下降, 流动人口则从 2015 年开始平均每年减少约 14 万人。常住人口及流动人口的减少, 一方面改变了北京市的人口密度; 另一方面, 由于流动人口多为青壮年劳动力, 且为接受过一定教育的人群, 流动人口的减少导致北京市人口的素质结构、年龄结构均从 2015 年开始呈现下降趋势, 降低了人口安全性。同时, 受人口规模变动的影响, 北京市人均水、土地、森林、能源等自然资源要素均不断增加, 降低了自然资源脆弱性。但人口变动对自然资源脆弱性的影响是有限的, 人口不断减少对自然资源脆弱性造成的边际收益呈现递减的趋势; 反之, 人口不断减少导致人口安全性边际损失呈现递增的趋势。最终导致北京市人口—自然资源系统可持续性趋于平稳。

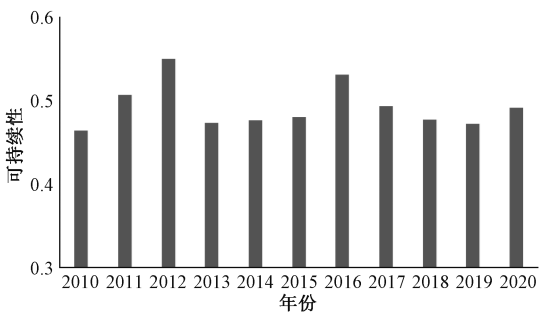


图 3 北京市人口—自然资源系统可持续性变动趋势

人口、自然资源各方面因素的改变并不是自发的, 通过对北京市的调控政策进行梳理发

现，北京市在 2015 年提出非首都功能疏解，实施或加强了一系列人口、自然资源相关的调控政策。因此，政策干预很可能是引起人口—自然资源系统可持续性发生变化的原因，而政府干预政策与人口、自然资源之间是否具有统计学上的因果关系，还有待进一步论证。

2. 政策因果辨析

对人口—自然资源系统可持续性造成影响的政府干预政策从影响对象来看主要可分为三类：对人的调控、对自然资源的管制以及对自然资源利用技术的促进。为了便于分析，本文将三类政府干预政策命名为人口调控、资源管制和技术改进。其中，人口调控政策会导致人口规模和人口结构发生变动，是影响城市人口安全性的主要因素不用赘述。而对于自然资源来说，人口调控、资源管制以及技术改进均会导致自然资源脆弱性发生变动。以水资源为例，人口调控政策对人口规模和结构的调整使得水资源受到的压力发生变化，改变了其敏感性；而技术改进导致用水效率的提高，改变了其暴露性；资源管制对用水标准的制定则会改变其适应性。为了对其中的因果关系进行论证，本文利用格兰杰因果分析来进行检验。该检验方法为 2003 年诺贝尔经济学奖得主格兰杰（Granger）所开创，用于分析变量之间的格兰杰因果关系，可以从统计学角度来验证 x 因素是否为 y 因素的原因，如果 x 对 y 的格兰杰因果关系检验显著，证明从统计学角度来看， x 是 y 的格兰杰原因^[59]。

表 2 展示了格兰杰因果分析的结果^①。考虑到政策调控的影响效果，因此对政策调控会产生直接影响的指标进行加权求和，以求最客观和全面地代表某项政策。其中，人口调控政策为常住人口规模、流动人口规模和人口空间结构的加权结果，资源管制政策为建筑面积占比、环保支出和水土流失治理的加权结果，技术改进政策为能源利用效率和污水处理率的加权结果。可以发现，从统计学角度看，人口调控政策是能源、水资源和森林资源发生变动的格兰杰原因；资源管制政策是能源和森林资源变动的格兰杰原因；技术改进政策是能源和森林资源变动的格兰杰原因。同时，人口调控政策会改变人口的分布，从而影响到土地资源的敏感性和适应性，而资源管制和技术改进则难以对土地资源形成直接影响。

表 2 格兰杰因果检验的结果

解释变量	被解释变量	p 值	结论
人口调控政策	能源	0.000	人口调控政策是能源的格兰杰原因
	水资源	0.007	人口调控政策是水资源的格兰杰原因
	森林资源	0.000	人口调控政策是森林资源的格兰杰原因
资源管制政策	能源	0.000	资源管制政策是能源的格兰杰原因
	水资源	0.602	资源管制政策不是水资源的格兰杰原因
	森林资源	0.000	资源管制政策是森林资源的格兰杰原因
技术改进政策	能源	0.000	技术改进政策是能源的格兰杰原因
	水资源	0.727	技术改进政策不是水资源的格兰杰原因
	森林资源	0.000	技术改进政策是森林资源的格兰杰原因

综上所述可以发现，虽然人口调控政策、资源管制政策和技术改进政策均会对自然资源形成显著影响，但是技术改进政策和资源管制政策均只能对部分自然资源（能源、森林资源）

① 进行格兰杰因果关系检验需要数据是平稳的，本文先通过差分消除了时间序列数据的趋势，得到了平稳数据。随后进行了格兰杰因果关系检验，并对结果进行了整理。考虑到文章篇幅，且本部分并非本文重点，因此并未放入详细过程，感兴趣的读者可联系笔者索取。

形成显著影响,而人口调控政策可以同时自然资源的四个主要要素(土地资源、能源、水资源和森林资源)形成显著影响。由于人口调控政策不仅是城市人口安全性的主要影响因素,也是自然资源脆弱性的主要影响因素,所以对于北京市人口—自然资源系统可持续性而言,人口调控政策为主要影响因素,资源管制政策和技术改进政策为次要影响因素。

五、混合政策模拟与分析

根据上面的分析可以发现,政府干预政策会影响人口—自然资源可持续性的变动。因此,对政府干预政策进行科学合理的情景模拟,可以为政策的制定提供依据,提高政府行政效率。

1. 情景设置

在对政府干预政策的综合影响效果进行情景设置时,由于是对未来可能发生状况的模拟,政府可能会根据实际需要采取不同强度及组合的干预政策对人口—自然资源系统进行调控。考虑到政府行政资源有限,多种政府干预政策未必能同时实行,并且人口调控政策为主要影响因素,其他政策干预为次要影响因素,因此设置人口调控政策为主,并逐步增加资源管制和技术改进的政策干预组合。同时,设置稳健、中等和激进三种政策干预水平,形成政策情景矩阵。

不同政策干预水平主要是依据北京市人口、资源和技术变动的实际情况,并结合北京市“十四五”规划中对人口、技术、资源等方面的目标进行设置。首先,考虑到不同目标实现难度不同,假设北京市政府按照最低速度实现目标,可以利用 $\sqrt[5]{A_{2025}/k_{2020}} * 100\%$ 公式(其中 A_{2025} 代表某指标在北京市“十四五”规划中的2025年目标值, k_{2020} 代表该指标2020年的实际值)计算得到各指标能够实现2025年目标的最低平均变动幅度。随后结合2016—2020年(考虑到相邻规划周期的政策目标变动相对较小,且太过久远的数据参考价值较低,因此没有选择2010—2020年)间人口、资源和技术变动的最高和最低幅度进行比较,主要可分为如下几种情况:①政策目标已实现,但仍需要政策调控来维持。以常住人口规模为例,北京市“十四五”规划目标为2025年常住人口规模保持在2300万以内,2020年常住人口为2189万,若想实现目标,只需要控制每年常住人口增长率不超过0.99%即可,但从2016年开始,北京市常住人口规模呈下降趋势,且下降的最小幅度为0.02%,下降的最大幅度为0.77%。因此,以实现北京市“十四五”规划目标为前提,可以设置稳健情景下常住人口变动为0.99%,中等情景下变动-0.02%,激进情景下变动-0.77%。②政策目标未实现,但比较接近。以污水处理率为例,北京市“十四五”规划目标为2025年污水处理率达到98%以上,2020年北京市污水处理率为94.4%,若想实现目标,只需要每年增加0.7%,而2016—2020年间污水处理率增加的最低幅度为1.1%,最高幅度为7.6%。同样以实现北京市“十四五”规划目标为前提,可以设置稳健情景下污水处理率变动0.7%、中等情景下变动1.1%、激进情景下变动7.6%。③政策目标未实现,且差距较大。例如北京市“十四五”规划目标为2025年城乡产业用地占城乡建设用地比重保持在25%以内,2020年该指标约为29.1%,若想达到目标需要每年下降3.12%,但2016—2020年间,该指标下降的最低幅度为0.08%,下降的最高幅度为5.68%,因此以实现目标为前提,设置出稳健情景下建筑面

积占比变动 -3.12%、中等情景下变动-4.4%^①、激进情景下变动 -5.68%。^④只有定性描述，没有定量要求的规划目标。例如，北京市“十四五”规划提出“坚持经济发展就业导向，持续优化就业结构”，“着力优化城市空间结构，推动中心城区疏解提质”等，此类目标则主要根据“十四五”规划方向以及 2016—2020 年间该项指标变动的最小幅度、平均幅度以及最大幅度设置相应的稳健、中等、激进情景。

最终可以得到如表 3 所示的政策情景矩阵。其中，S1 为基础情景，为 2020 年北京市各政策干预指标及可持续性评估结果；S2—S13 为稳健情景下人口调控政策单独实施（S2—S4），人口调控政策与资源管制政策共同实施（S5、S6、S7、S11），人口调控政策与技术改进政策共同实施（S8、S9、S10、S12），人口调控、资源管制、技术改进政策共同实施（S13）的不同政策组合；S14—S25 为中等情景下不同政策组合（分类方式同上）；S26—S37 为激进情景下不同政策组合（分类方式同上）。

2. 情景模拟结果分析

政策干预强度增加导致北京市人口—自然资源系统可持续性提高，但干预强度增加到一定程度后，可持续性提升空间变小且趋于稳定。表 4 展示了不同情境下的人口—自然资源各系统特性水平。可以发现：①随着政策干预强度的增加，北京市人口—自然资源系统可持续性越来越高，但是变动幅度逐渐趋缓（稳健（S13）、中等（S25）、激进（S27）的政策干预分别使人口—自然资源系统可持续性增强了 1.02%^②、6.23%、9.44%），也就是说，随着调控政策强度的增加，北京市人口—自然资源系统可持续性的边际收益逐渐下降。②多种政策组合时，效果优于单个政策单独实施，稳健的人口调控政策单独实施（S2）可以使北京市人口—自然资源系统可持续性增强约 0.22%，而稳健的人口调控、资源管制和技术改进政策共同实施可以使北京市人口—自然资源系统可持续性增强约 1.02%。

3. 基于 Laplace 准则的决策选择

在面对不确定决策时，由于客观限制，不可能同时选择所有可能的决策，因此本文引入 Laplace 准则进行决策选择。首先，使用决策准则的适应性在于：①在人口—自然资源系统决策中，通过风险模拟会产生一个多情景决策矩阵（包括不同强度及组合的干预政策），其中，决策者对人口调控、技术改进和资源管制政策的风险偏好会直接影响人口—自然资源系统的可持续性，但是，由于数据有限，无法准确拟合不同风险喜好的决策者所制定的决策方案。因此，需要一种更有效的决策方法，综合风险、成本及收益来获得符合实际的最优决策，该决策可以通过合理使用人口调控、资源管制和技术改进政策，控制人口系统、自然资源系统的多维风险，来维持或者改进人口—自然资源系统可持续性。②在实际政府干预政策的过程中，稳健的政府干预政策会增加系统风险，不利于北京市的长期发展。而激进的政府干预政策会增加直接成本和机会成本，使得总系统收益下降。所以，本文通过引入 Laplace 决策准则平衡成本和风险关系，选出理论上的最优情景，减少试错成本，以增加现实中的可操作性。

① 针对此类情景，中等情景下变动幅度取变动的最低幅度与最高幅度的平均值。
② 由公式 $(S13-S1)/S1 \times 100\%$ 计算得出，中等和激进情景的变动幅度采用同样的计算方式。文中数据依据原始数值计算，表 4 仅保留三位小数，如需原始数值可向作者索取。

表 3 政策情景设置

情景	人口调控						技术改进						资源管制					
	人口规模			就业结构			空间结构			能源利用效率			污水处理率			建筑面积占比		
	数值 (万人)	变动幅 度 (%)		数值	变动幅 度 (%)		数值	变动幅 度 (%)		数值 (%)	变动幅 度 (%)		数值 (%)	变动幅 度 (%)		数值 (%)	变动幅 度 (%)	
基础	S1	2918.80	0.00	29,270	0.00	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
稳健	S2	2906.54	-0.42	29,270	0.00	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S3	2918.80	0.00	28,802	-1.60	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S4	2918.80	0.00	29,270	0.00	1.104	-1.20	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S5	2906.54	-0.42	29,270	0.00	1.118	0.00	0.782	3.10	0.96	0.70	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S6	2918.80	0.00	28,802	-1.60	1.118	0.00	0.782	3.10	0.96	0.70	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S7	2918.80	0.00	29,270	0.00	1.104	-1.20	0.782	3.10	0.96	0.70	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S8	2906.54	-0.42	29,270	0.00	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.272	-3.12	399.45	0.00	36.10	0.00	
中等	S9	2918.80	0.00	28,802	-1.60	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	419.42	5.00	36.10	0.00	
	S10	2918.80	0.00	29,270	0.00	1.104	-1.20	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	37.33	3.40	
	S11	2906.54	-0.42	28,802	-1.60	1.104	-1.20	0.782	3.10	0.96	0.70	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S12	2906.54	-0.42	28,802	-1.60	1.104	-1.20	0.759	0.00	0.95	0.00	0.272	-3.12	419.42	5.00	37.33	3.40	
	S13	2906.54	-0.42	28,802	-1.60	1.104	-1.20	0.782	3.10	0.96	0.70	0.272	-3.12	419.42	5.00	37.33	3.40	
	S14	2894.57	-0.83	29,270	0.00	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S15	2918.80	0.00	27,924	-4.60	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S16	2918.80	0.00	29,270	0.00	1.088	-2.70	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S17	2903.62	-0.83	29,270	0.00	1.118	0.00	0.794	4.70	0.96	1.10	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	
	S18	2918.80	0.00	27,924	-4.60	1.118	0.00	0.794	4.70	0.96	1.10	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00	

续表3

情景	人口调控				技术改造				资源管制								
	人口规模		就业结构		空间结构		能源利用效率		污水处理率		建筑面积占比		环保支出		水土流失治理面积		
	数值 (万人)	变动幅 度 (%)	数值	变动幅 度 (%)	数值	变动幅 度 (%)	数值 (%)	变动幅 度 (%)	数值 (%)	变动幅 度 (%)	数值 (%)	变动幅 度 (%)	数值 (亿元)	变动幅 度 (%)	数值 (千公顷)	变动幅 度 (%)	
激进	S19	2918.80	0.00	29.270	0.00	1.088	-2.70	0.794	4.70	0.96	1.10	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S20	2903.62	-0.83	29.270	0.00	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.266	-4.40	439.40	10.00	38.41	6.40
	S21	2918.80	0.00	27.924	-4.60	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.266	-4.40	439.40	10.00	38.41	6.40
	S22	2918.80	0.00	29.270	0.00	1.088	-2.70	0.759	0.00	0.95	0.00	0.266	-4.40	439.40	10.00	38.41	6.40
	S23	2903.62	-0.83	27.924	-4.60	1.088	-2.70	0.794	4.70	0.96	1.10	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S24	2903.62	-0.83	27.924	-4.60	1.088	-2.70	0.759	0.00	0.95	0.00	0.266	-4.40	439.40	10.00	38.41	6.40
	S25	2903.62	-0.83	27.924	-4.60	1.088	-2.70	0.794	4.70	0.96	1.10	0.266	-4.40	439.40	10.00	38.41	6.40
	S26	2873.27	-1.56	29.270	0.00	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S27	2918.80	0.00	27.192	-7.10	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S28	2918.80	0.00	29.270	0.00	1.074	-3.90	0.759	0.00	0.95	0.00	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S29	2873.27	-1.56	29.270	0.00	1.118	0.00	0.831	9.50	1.00	7.60	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S30	2918.80	0.00	27.192	-7.10	1.118	0.00	0.831	9.50	1.00	7.60	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S31	2918.80	0.00	29.270	0.00	1.074	-3.90	0.831	9.50	1.00	7.60	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S32	2873.27	-1.56	29.270	0.00	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.261	-5.68	459.37	15.00	39.49	9.40
	S33	2918.80	0.00	27.192	-7.10	1.118	0.00	0.759	0.00	0.95	0.00	0.261	-5.68	459.37	15.00	39.49	9.40
	S34	2918.80	0.00	29.270	0.00	1.074	-3.90	0.759	0.00	0.95	0.00	0.261	-5.68	459.37	15.00	39.49	9.40
	S35	2873.27	-1.56	27.192	-7.10	1.074	-3.90	0.831	9.50	1.00	7.60	0.280	0.00	399.45	0.00	36.10	0.00
	S36	2873.27	-1.56	27.192	-7.10	1.074	-3.90	0.759	0.00	0.95	0.00	0.261	-5.68	459.37	15.00	39.49	9.40
	S37	2873.27	-1.56	27.192	-7.10	1.074	-3.90	0.831	9.50	1.00	7.60	0.261	-5.68	459.37	15.00	39.49	9.40

表4 不同情景下北京市人口—自然资源系统各特性水平

情景		水平值											
基础	S1												
安全性	0.572												
脆弱性	0.590												
可持续性	0.491												
稳健	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	
安全性	0.564	0.558	0.561	0.564	0.558	0.561	0.564	0.558	0.571	0.569	0.569	0.569	
脆弱性	0.580	0.508	0.570	0.580	0.556	0.566	0.581	0.581	0.581	0.580	0.581	0.577	
可持续性	0.492	0.489	0.495	0.492	0.501	0.498	0.492	0.489	0.495	0.494	0.494	0.496	
中等	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	
安全性	0.556	0.539	0.561	0.556	0.539	0.561	0.556	0.539	0.561	0.562	0.562	0.562	
脆弱性	0.534	0.570	0.560	0.535	0.551	0.541	0.538	0.574	0.564	0.535	0.538	0.519	
可持续性	0.511	0.485	0.501	0.510	0.494	0.510	0.509	0.483	0.499	0.513	0.512	0.522	
激进	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	
安全性	0.539	0.507	0.546	0.539	0.507	0.546	0.539	0.507	0.546	0.547	0.547	0.547	
脆弱性	0.495	0.545	0.535	0.488	0.518	0.508	0.500	0.550	0.540	0.488	0.500	0.473	
可持续性	0.522	0.481	0.505	0.525	0.494	0.519	0.519	0.478	0.503	0.530	0.524	0.537	

其次，相比其他决策准则（如乐观准则、悲观准则、后悔准则等），Laplace 准则的优势在于：①人口调控、资源管制和技术改进政策的不同组合均为政策执行的备选方案，但是在具体确定政策前，无法主观判断出到底哪种方案或哪几种方案组合才是风险最小且效益最大的方案，面对这种多情景、多组合、高度不确定性的问题时，Laplace 准则模拟可以有效破解这一困境。通过将不确定的定性问题转化为确定的定量问题，可以帮助政府制定更为科学的政策，以增强人口—自然资源系统可持续性。②Laplace 决策模拟不需要预设决策者的风险喜好，而是将决策者风险喜好以均等化概率引入决策过程，可以在最少信息下作出较符合实际的最优决策。因此本文应用 Laplace 准则来完善情景模拟，将政策制定者的风险喜好以概率的形式引入政策制定过程，同时综合考虑不同决策组合的风险、成本及收益得到最优情景（Laplace 情景），完善了情景决策过程。

Laplace 准则又被称为等可能准则（equally liability criterion），此准则由数学家拉普拉斯（Laplace）于 19 世纪提出，主要用于信息不完全时的决策，相比其他决策准则（乐观准则、悲观准则、后悔准则等），Laplace 准则不需要预先了解决策者风险喜好，在决策者风险喜好不确定情况下模拟结果会更接近实际情况^[60]。其计算公式为：

$$P_1 = P_2 = P_3 = \cdots = P_m \tag{5}$$

$$V_e = 1/m \sum_1^m v_i \tag{6}$$

$$V_{max} = Max V_e \tag{7}$$

其中， P_i 为不同情景发生的概率， m 为稳健、中等、激进水平下不同情景的个数， v_i 代表第 i 种政府干预政策情景下的收益，该收益等于实施干预政策引起的人口—自然资源系统可持续性提高减去实施干预效果的投入成本（为了统一量纲，均进行了标准化计算）。 V_e 代表稳健、中等、激进水平下不同情景的期望收益。 V_{max} 代表 V_e 中的最大值，其所代表的方案即 Laplace 准则下的最优方案。最终，根据不同政府干预政策的界定和投入产出计算，可以

得到如表 5 所示的 Laplace 决策矩阵。可以看出，在 Laplace 决策模拟下，中等水平下政府干预政策的期望收益最高，其中情景 S25 下的政府干预政策组合具有最高收益，为 Laplace 情景。根据表 3 可得，Laplace 情景（S25）的各项指标为：人口规模下降 0.83%，就业结构下降 4.6%，空间结构下降 2.7%，能源利用效率提高 4.7%，污水处理率提高 1.1%，建筑面积占比减少 4.4%，环保支出增加 10%，水土流失治理增加 6.4%。

表 5 Laplace 决策矩阵

情景	稳健	情景	中等	情景	激进
S2	0.1025	S14	0.1494	S26	0.0522
S3	0.0520	S15	0.0718	S27	0.0107
S4	0.2013	S16	0.1590	S28	0.1824
S5	0.2190	S17	0.2310	S29	0.2597
S6	0.2042	S18	0.2294	S30	0.2181
S7	0.2425	S19	0.2510	S31	0.2617
S8	0.2763	S20	0.2706	S32	0.3167
S9	0.2734	S21	0.2665	S33	0.2777
S10	0.2978	S22	0.3006	S34	0.3223
S11	0.3481	S23	0.3681	S35	0.3207
S12	0.3467	S24	0.3390	S36	0.3096
S13	0.3867	S25	0.3960	S37	0.3590
Laplace 期望收益	0.2459	Laplace 期望收益	0.2527	Laplace 期望收益	0.2409

根据对人口—自然资源系统的政策模拟计算结果，在考虑多种混合政策（不同风险及强度）等概率发生时的最优情景（Laplace 情景）下，人口安全性减弱了 1.82%^①，而同时自然资源脆弱性减弱了 12.13%，最终使得人口—自然资源系统可持续性增强了 6.23%。此时人口系统安全性的损失不大，而自然资源系统脆弱性的收益较高。主要原因在于 Laplace 情景下，假定决策者风险中性，各调控政策强度等概率发生，使得该情境下不同调控政策强度均比较中庸，此时由于人口安全性和自然资源脆弱性本身的特质（边际收益的变动方向不同），导致人口—自然资源系统的主要因素在内部博弈中达到和谐，既有效降低了自然资源脆弱性，又使人口安全性处于较高水平。同时，稳健的政策情景对北京市人口—自然资源系统影响有限，而激进的政策情景可能会造成一定的资源浪费，Laplace 情景（S25）下的政策强度既可以有效提高北京市人口—自然资源系统的持续性，又考虑了不确定决策者的政策偏好，避免了激进的政策干预导致的资源浪费，所以 Laplace 情景（S25）为理论上的最优情景。

4. 北京市人口—自然资源系统可持续性的未来模拟

图 4 展示了不同情景下 2020—2025 年北京市人口—自然资源系统可持续性的变动趋势。根据上面得出的稳健、激进和 Laplace 情景，以 2020 年数据为基础，对未来五年不同水平下北京市人口—自然资源系统可持续性进行模拟，可以发现：稳健情景（S13）下，北京市人口—自然资源系统可持续性增强并不明显，主要原因在于，尽管资源管制、技术改进等干预

① 由公式 $(S25-S1) / S1 \times 100\%$ 计算得出，后面比例同此方法。本文数值依据原始数据计算，表 4 仅保留三位小数，如需原始数据可向作者索取。

政策有助于减弱自然资源系统脆弱性，但是，人口的不断增加会对自然资源系统脆弱性形成压力，综合作用下使得人口—自然资源系统可持续性提升缓慢；而激进情景下，北京市人口—自然资源系统可持续性增强，在达到一定水平后反而有减弱趋势，主要原因在于，在激进情景（S37）下，资源、技术等方面的指标在提高到一定水平后无法提升（例如，污水处理率在激进水平下于2022年达到100%），导致自然资源系统脆弱性在减弱到一定水平后保持稳定，而人口系统安全性却随着人口规模的减少不断下降，最终导致人口—自然资源系统可持续性在达到瓶颈后不再增强，甚至开始出现下降趋势；相比稳健和激进情景，Laplace情景（S25）下，北京市人口—自然资源系统可持续性既有明显增强，又避免了过于激进的政策干预使得部分资源、技术等要素过早到达瓶颈所造成的资源浪费，也证明了Laplace情景为最优情景。

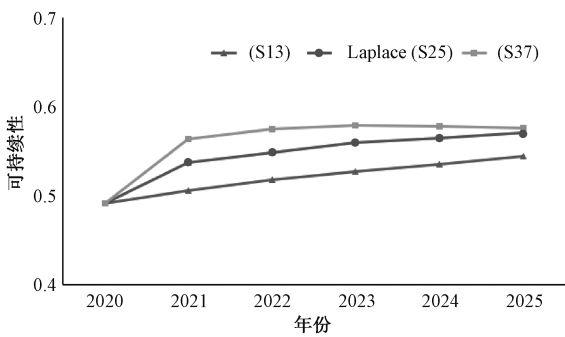


图4 不同情景下北京市人口—自然资源系统可持续性变动趋势

六、结论与讨论

本文通过构建人口—自然资源系统可持续性评价框架，并在混合政策模拟过程中引入Laplace准则来考虑决策者风险喜好，对北京市人口—自然资源系统可持续性进行研究，得出以下结论。

第一，政策干预是保证北京市人口—自然资源系统可持续发展的重要手段。其中，人口调控政策是北京市人口—自然资源系统可持续性变动的主要影响因素，资源管制和技术改进是次要影响因素。制定科学合理的人口调控、资源管制和技术改进政策并有效实施，是促进人口、资源、环境在空间上均衡以及区域可持续发展的有效方式。

第二，在一定范围内，政策干预强度越高，人口—自然资源系统可持续性的变动越大。但随着干预政策强度的增加，由于干预政策对人口系统、自然资源系统影响方向不同，以人口调控为例，随着人口规模的下降，人口安全性的边际损失在不断提高，而自然资源脆弱性的边际收益在不断降低。因此，人口下降引起的人口—自然资源系统可持续性的边际收益会逐渐下降，导致人口—自然资源系统可持续性的变动趋于平稳。可见政策干预强度并不是越高越好，而是要根据政策干预的实际效果灵活调整，从而实现政策干预收益的最大化。

第三，在利用Laplace准则引入决策者风险喜好得出的最优情景（Laplace情景）下，人口系统安全性减弱了约1.82%，而自然资源脆弱性减弱了约12.13%，最终使得人口—自然资源系统可持续性增强了约6.23%。激进的干预政策（例如北京市常住人口规模下降0.77%、流动人口规模下降3.74%，环保投资增加15%，污水处理率提高7.6%，水土流失治理面积增加9.4%等）会占用大量的行政、自然资源，形成资源挤占效应，导致一定的资

源浪费，甚至引发一定的社会问题；而稳健的干预政策又不能很好地缓解北京市目前人口与自然资源之间的矛盾；Laplace 情景通过风险博弈既考虑了决策者风险喜好又兼顾了政策的实施效率；对稳健、激进和 Laplace 情景下 2020—2025 年北京市人口—自然资源系统可持续性的模拟结果也证明了这一点，因此最有效的方案是 Laplace 情景下的政策干预组合，此时人口规模下降 0.83%，就业结构下降 4.6%，空间结构下降 2.7%，能源利用效率提高 4.7%，污水处理提高 1.1%，建筑面积占比减少 4.4%，环保支出增加 10%，水土流失治理增加 6.4%。

本文还具有一定局限性，在城市发展过程中，政策制定者不仅要考虑人口系统安全性和自然资源系统脆弱性，还需要考虑城市经济发展、功能定位、城市化进程等方面，但是受限于数据和分析框架的设定，本文并没有进行更深层次的讨论，以上还有待进一步的研究。

参考文献：

[1] 黄志烨,李桂君,李玉龙,常远. 基于 DPSIR 模型的北京市可持续发展评价 [J]. 城市发展研究, 2016 (9): 20-24.

[2] 赵弘,李柏峰. 促进首都经济与人口资源环境协调发展的战略思考 [J]. 北京市经济管理干部学院学报, 2014 (1): 15-20.

[3] 姜石良. 河北省环首都地区与北京协调发展研究 [J]. 城市规划, 2011 (9): 89-91.

[4] 刘学敏,王玉海,敖华. “首都区”经济、社会、生态统筹协调发展研究 [J]. 经济纵横, 2008 (4): 40-42.

[5] 董庆前,李治宇. 人口变化带来的收缩型城市问题如何破解 [J]. 人民论坛, 2020 (28): 74-75.

[6] 丁志刚. 新时期江苏人口城市化发展的特征与趋势研究 [J]. 城市规划, 2013 (2): 27-30.

[7] 谢波,陈仲常. 自然资源、人力资本异质性与区域经济增长——基于省际面板数据的经验分析 [J]. 人口与经济, 2011 (4): 35-44.

[8] 袁晓玲,梁鹏,曹敏杰. 基于可持续发展的陕西省城镇化发展质量测度 [J]. 城市发展研究, 2013 (2): 52-56, 86.

[9] 刘文政,朱瑾. 资源环境承载力研究进展：基于地理学综合研究的视角 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017 (6): 75-86.

[10] 张保成,国峰. 自然资源承载能力问题研究综述 [J]. 经济经纬, 2006 (6): 22-25.

[11] 祝尔娟,齐子翔,毛文富. 区域承载力与生态文明建设——2012 首都圈发展高层次论坛观点综述 [J]. 生态经济, 2014 (2): 51-67.

[12] LLOYD W F. Two lectures on the population [M]. Qxford, England: Qxford University Press, 1832, 32-56.

[13] HARDIN G. The tragedy of the commons [J]. Science, 1969, 162 (5364): 1243-1248.

[14] 熊升银,周葵,刘思岑. 人口、资源、环境与经济社会协调发展研究述评与展望 [J]. 广西社会科学, 2020 (8): 62-68.

[15] 陈百明. “中国土地资源生产能力及人口承载量”项目研究方法概论 [J]. 自然资源学报, 1991 (3): 197-205.

[16] 谢俊奇. 中国土地资源的食物生产潜力和人口承载潜力研究 [J]. 浙江学刊, 1997 (2): 41-44.

[17] 辜胜阻,魏珊. 保持环境与经济协调发展的思考 [J]. 武汉大学学报 (人文社会科学版), 2000 (3): 294-298.

[18] 张培丽,阴朴谦,管建洲. 人口、资源与环境经济学研究新进展及未来研究方向 [J]. 经济研究参考, 2020 (1): 27-45.

[19] 李善同,刘勇. 环境与经济协调发展的经济学分析 [J]. 经济研究参考, 2002 (6): 5-12.

[20] 央视财经. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告 [EB/OL]. [2017-10-18]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1581590173511475862&wfr=spider&for=pc>.

- [21] 郑艳,潘家华,谢欣露,周亚敏,刘昌义. 基于气候变化脆弱性的适应规划:一个福利经济学分析 [J]. 经济研究, 2016 (2): 140-153.
- [22] 童玉芬,马艳林. 城市人口空间分布格局影响因素研究——以北京为例 [J]. 北京社会科学, 2016 (1): 89-97.
- [23] 陈妍,梅林. 东北地区资源型城市转型过程中社会-经济-环境协调演化特征 [J]. 地理研究, 2018 (2): 307-318.
- [24] 王如松,陈亮. 中国人口生态态势的系统分析和空间发展格局探讨 [J]. 人口研究, 2007 (2): 1-14.
- [25] 王桂新. 我国大城市病及大城市人口规模控制的治本之道——兼谈北京市的人口规模控制 [J]. 探索与争鸣, 2011 (7): 50-53.
- [26] 穆光宗. 人口增长与“大城市病”诊治——以北京市为例 [J]. 人民论坛, 2010 (32): 8-9.
- [27] 郭志刚. 人口、资源、环境与经济发展之间关系的初步理论思考 [J]. 人口与经济, 2000 (6): 12-16.
- [28] 李恒吉,曲建升,庞家幸,徐丽,韩金雨. 甘肃省人口—经济—社会—资源—环境系统耦合协调及可持续发展时空综合测度研究 [J]. 干旱区地理, 2020 (6): 1622-1634.
- [29] 李少坤,王少军,张志,陈晓倩. 三维生态足迹视角下江西省自然资本可持续利用演化及其驱动因素 [J/OL]. 中国农业资源与区划: 1-14. [2021-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.s.20210607.1759.044.html>.
- [30] 彭争呈,郭仕利. 基于改进模型的西南地区相对资源承载力研究——以四川省雅安市为例 [J]. 地域研究与开发, 2018 (1): 153-158.
- [31] 赵磊,王立权,戴长雷,庚军辉. 基于 DPSIRM 模型的太原市水资源承载力研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2021 (2): 109-115.
- [32] 高杰,刘树昇,高立谦. 城市发展与人口安全 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014 (1): 211-216.
- [33] 刘建华,黄亮朝,左其亨. 黄河下游经济—人口—资源—环境和谐发展水平评估 [J]. 资源科学, 2021 (2): 412-422.
- [34] 胡鞍钢,刘生龙,马振国. 人口老龄化、人口增长与经济增长——来自中国省际面板数据的实证证据 [J]. 人口研究, 2012 (3): 14-26.
- [35] 李健,李宁宁. 京津冀绿色发展政策模拟及优化研究 [J]. 大连理工大学学报 (社会科学版), 2021 (4): 1-12.
- [36] 严旭,李明,梁志飞,梁涛,李莹,谭杰仁. 基于系统动力学模型的可再生能源消纳保障机制效果模拟 [J]. 南方电网技术, 2021 (3): 39-46.
- [37] 盛亦男,童玉芬. 北京市外来人口调控政策效应的定量分析 [J]. 中国人口科学, 2015 (6): 12-22, 126.
- [38] 胡静,陈银蓉. 湖北省土地政策评价模型的政策变量分析 [J]. 统计与决策, 2007 (19): 102-104.
- [39] 郭志,唐绍祥,王鹏. 基于 CGE 模型的能源政策效果模拟分析 [J]. 商业研究, 2014 (2): 44-50.
- [40] 陆铭. 人口疏解未必是城市发展的必经之路 [J]. 人民论坛, 2020 (21): 68-72.
- [41] ZENG X T, HU Z J, ZHANG J, et al. Toward a sustainable water resources management in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration: a scenario analysis of combined strategy regulation with Green Z-score criterion [J]. Urban Water Journal, 2019, 16 (8): 537-553.
- [42] ZENG X T, HUANG G H, CHEN H L, et al. A simulation-based water-environment management model for regional sustainability in compound wetland ecosystem under multiple uncertainties [J]. Ecological Modelling, 2016, 334: 60-77.
- [43] 王雅晴,冼超凡,欧阳志云. 基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价 [J]. 生态学报, 2021 (8): 2983-2995.
- [44] 王建事,程钰,丁立,王鑫静. 山东省自然资本动态演变及驱动因素研究 [J]. 生态经济, 2019 (3): 158-165.
- [45] 韩文艳,陈兴鹏,张子龙,王宁飞,于原浩. 中国地级及以上城市水资源利用效率的时空格局分析 [J]. 水土保持研究, 2018 (2): 354-360.
- [46] XU K, BIN L L, XU X Y. Assessment of water resources sustainability in mainland China in terms of water intensity and efficiency [J]. Environmental Management, 2019, 63 (3): 309-321.
- [47] 穆光宗. 对人口安全大勢的几点认识 [J]. 北京工业大学学报 (社会科学版), 2016 (4): 1-11.

[48] 童玉芬, 周文. 中国人口、资源与环境经济学 20 年回顾: 发展与挑战 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018 (11): 171-176.

[49] 高杰, 刘树昇, 高立谦. 城市发展与人口安全 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014 (1): 211-216.

[50] FENG Y, HE D M. Transboundary water vulnerability and its drivers in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19 (2): 189-199.

[51] CHAFFIN B C, GOSNELLAND H, COSENS B A. A decade of adaptive governance scholarship: synthesis and future directions [J]. Ecology and Society, 2014, 19 (3): 56-78.

[52] 王岩, 方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究 [J]. 地理科学, 2014 (5): 547-555.

[53] VOROSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth [J]. Science, 2000, 289 (5477): 284-288.

[54] 周长洪. 人口问题、人口安全与人口管理 [J]. 人口研究, 2005 (3): 54-57.

[55] 王玲杰. 人口安全动态评价指标体系及评价模型 [J]. 统计与决策, 2009 (20): 12-14.

[56] 温勇, 徐铭东, 宗占红, 袁静, 帅友良. 沿边地区人口安全问题与对策——以阿拉善盟为例 [J]. 人口与发展, 2014 (6): 16-24.

[57] 高杰, 刘树昇, 高立谦. 城市发展与人口安全 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014 (1): 211-216.

[58] 梁强. 人口安全视角下的大连市城市化问题研究 [J]. 城市发展研究, 2009 (8): 35-39.

[59] 陈强. 高级计量经济学及 Stata 应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 381-382.

[60] 陆雄文. 管理学大辞典 [M]. 上海: 上海辞书出版社, 2013: 129-110.

Research on the Sustainable Development Level of Population-Natural
Resource System in Megacities: Based on Laplace Mixed Policy Simulation

ZENG Xueting, XUE Yong

(School of Labor Economics, Capital University of Economics and Business,
Beijing 100070, China)

Abstract: Population growth and agglomeration have provided an impetus for urban development, but which have brought great disturbance to the natural resource system, leading it to show the characteristics of vulnerability. In order to achieve sustainable development of population-natural resources, the government has implemented numbers of regulations and control policies in recent years. However, complex policies and their interactions on urban population-natural resource system are difficult to quantify in an accurate manner, which would increase the difficulty of balancing the relationship between urban population and natural resources. Therefore, this paper constructs a framework for evaluating the sustainability of population-natural resource system in Beijing. From the perspective of policy interventions, it analyzes the causal relationship between different types of regulatory policies (such as population regulation, technical improvement, and resource control, etc.) and population-natural resources. Meanwhile, it combined with the use of the Laplace criterion and the risk preferences of decision makers, to simulate the impact of mixed policy intervention on the sustainability of the population-natural resource system. The results show

that: 1) Policy intervention is an important means to ensure the sustainable development of Beijing's population-natural resources system. Population control policies are the main influencing factors for the change of Beijing's population-natural resource system sustainability, while resource control and technological improvement are secondary factors; 2) As the intensity of policy interventions enhances, the sustainable level of population-natural resource in Beijing has gradually stabilized based on tradeoff between population system security and natural resource system fragility; 3) In Laplace scenario, population security decreased by 1.82%, with a small loss. The vulnerability of natural resources decreased by 12.13%, and the income was higher. Finally, the sustainability of the population-natural resource system was enhanced by 6.23%. Therefore, policy intervention needs to take population security and natural resource vulnerability into consideration, rather than taking advantage of one and the other, so as to maximize the benefits of the population-natural resource system.

Keywords: policy intervention; population-natural resource system; sustainability; mixed policy simulation; Laplace criterion

[责任编辑 武 玉]