

引用格式:徐牧天, 鲍超. 资源环境承载力弹性区间测度与未来情景分析: 以兰西城市群为例[J]. 资源科学, 2023, 45(10): 1961-1976. [Xu M T, Bao C. Elastic range measurement of resource and environmental carrying capacity and future scenario analysis: A case study of the Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 1961-1976.] DOI: 10.18402/resci.2023.10.04

# 资源环境承载力弹性区间测度与未来情景分析

## ——以兰西城市群为例

徐牧天<sup>1,2</sup>, 鲍超<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:**【目的】构建与资源环境承载力相适应的城镇规模体系,是实现城市群可持续发展的重要基础。但以单一绝对值为静态刚性约束的资源环境承载力测度方法,不符合资源环境综合承载力本身的动态性和不确定性特点。为此,本文旨在对资源环境承载力进行弹性区间测度和未来情景预测。【方法】本文提出了资源环境承载力弹性区间与状态类型的测定方法,构建了一套基于系统动力学和元胞自动机-马尔科夫模型的资源环境承载力量化分析框架,基于共享社会经济路径提供了资源环境承载力未来多情景分析方案,并以兰西城市群为案例进行了实证研究。【结果】①2000—2020年,兰西城市群资源环境承载力弹性区间由2000年的[1167, 1367]变化至2020年的[2049, 2069](单位:万人),承载状态由临界超载优化为不超载。②资源环境承载力弹性区间和各项单要素承载力在各地级行政单元基本均呈上升态势,并呈现出明显的空间分异。③2021—2035年,SSP1情景中的多数单要素承载力高于其他情景,同时人口增长率最低;SSP2作为基准情景,资源环境综合承载力的弹性区间、各项单要素承载力和常住人口均处于中间水平;SSP3是资源环境综合承载力的弹性区间最低且常住人口最多的情景;SSP5情景下,能源承载力最低,环境承载力居首。④SSP1情景下兰西城市群将呈现全域可承载的均衡格局,其余情景下则呈现“中间差外围优”的核心-边缘式空间分布格局。【结论】未来应当基于SSP1发展路径,从城镇发展格局适应性构建和承载潜力动态性提升两方面合力应对资源环境承载风险,促进人地关系协调发展。

**关键词:**资源环境承载力;弹性区间;情景分析;系统动力学;共享社会经济路径;CA-Marcov模型;兰西城市群

DOI: 10.18402/resci.2023.10.04

## 1 引言

工业革命以来,伴随着科技进步和生产水平快速提升,城镇化浪潮以不断加快的速度席卷全球。自20世纪下半叶“人类世”来临,全球城市人口迅速增长,已从1950年的7.51亿人增加到2018年的42亿人,占全球人口比重由30%上升至55.3%<sup>[1]</sup>。快速城镇化进程以各种方式、在不同程度上重塑着人类的生产和生活方式,同时为地表环境带来源源不断的累积压力,导致生态系统健康程度持续下降,

化石能源消费大幅提高,碳排放与地表温度不断攀升,水资源危机逐渐加重,耕地与其他自然栖息地面积压缩,大气、水、土壤等各类环境逐步退化<sup>[2]</sup>。资源利用上限、环境保护底线和生态安全成为制约人类可持续发展的关键<sup>[3]</sup>。作为可持续发展理念的重要体现,资源环境承载力旨在深入解析自然圈层对人类活动的支撑能力。增强资源环境承载力是解决人地矛盾的必然要求和必由路径,也是增进人类福祉与实现可持续发展目标的核心所在。

收稿日期: 2023-05-30 修订日期: 2023-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971208);第二次青藏高原综合科学考察研究专题项目(2019QZKK1005)。

作者简介: 徐牧天,女,安徽安庆人,博士研究生,主要从事城市群资源环境效率与承载力研究。E-mail: xmt\_11\_11@foxmail.com

通讯作者: 鲍超,男,湖北麻城人,研究员,博士生导师,主要从事资源环境约束下的城镇化与城市可持续发展研究。E-mail: baoc@igsnrr.ac.cn

资源环境承载力研究萌芽于1798年Maltus<sup>[4]</sup>发表的《人口原理》,此后土地资源承载力、水资源承载力、矿产资源承载力、环境承载力等单要素资源环境承载力概念被相继提出。20世纪末期,承载力研究出现重要转向,资源环境综合承载力研究逐渐兴起。在资源环境综合承载力的表征方式上,以往研究多采用资源环境可承载的最大人口规模这一绝对值进行表征,例如基于“木桶理论”选取各项单要素承载人口的最小值作为综合承载力的上限表达<sup>[5]</sup>,或将各项单要素承载力直接加权平均进行集成<sup>[6]</sup>。然而,根据资源之间的广义替代性原理和远距离互动关系,一种资源的不足可以通过区域内的其他优势资源来弥补,因此,上述静态刚性约束的确定性表达方式不符合资源环境综合承载力本身的动态性和不确定性特点<sup>[7]</sup>。也有研究采用资源环境承载力指数来描述资源环境承载状态的优劣<sup>[8,9]</sup>,然而该指数无法为人口宏观调控提供直接指导,学术价值较强而实践指导意义偏弱。为此,本文将沿用资源环境承载力的经典定义,将其界定为在可持续发展的前提下,一定地域空间内的资源禀赋和环境容量所能承载的最大人口规模<sup>[10]</sup>。为克服以人口绝对规模为代表的传统表征形式以及承载指数实践指导意义的不足,本文将构建人口弹性区间对资源环境综合承载力进行定量测度,以更好地体现其动态性和不确定性特点。

国内外地理学、生态学、环境经济学、资源科学等领域的学者们围绕资源环境承载力的测度提出了诸多研究框架、模型与方法<sup>[11]</sup>。指标体系法因具有易于理解的直观性和较强的可操作性,并且能够进行多层次、多维度的评价,所以在资源环境承载力评价当中得到了普遍和广泛的应用<sup>[8,9]</sup>。此外,量纲转换法将资源环境利用过程中不同种类的物质消耗统一折算为某一生物物理量或价值量,从而对地球系统压力和区域资源环境综合承载力的大小作出判断,代表性分析方法包括净初级生产力<sup>[12]</sup>、能值<sup>[13]</sup>、生态足迹<sup>[14]</sup>以及虚拟水<sup>[15]</sup>等。尽管指标体系法和量纲转换法有力地推动了资源环境承载力的量化分析进程,但对于资源环境承载力这一复杂系统的内部关联考虑不足,对多重要素之间复杂交互

机制的刻画和揭示能力相对薄弱。

与上述两种方法相比,系统动力学(System Dynamic, SD)模型能够更好地捕捉变量之间的交互效应。它基于非均衡动力学和系统回路复杂性,通过建立一阶微分方程组反映复杂系统中各模块变量之间的因果反馈关系,强调存量和流量变量之间的反馈动力机制以及相关的时间滞后<sup>[16]</sup>。由于资源环境承载力具有动态性和不确定性,因此,面向未来发展态势,预先研判不同发展情景下资源环境承载力的动态规律,是选择合理的社会经济发展路径和制定适应性、动态性政策的关键所在。而系统动力学模型具备对不同发展方案进行模拟和预测决策变量的能力,因此,可以作为资源环境承载力多情景发展方案预测和比对研究的有力工具。近年来,有研究将系统动力学模型与其他模型相结合以提高资源环境承载力的模拟精度和预测效果。例如,Wang等<sup>[17]</sup>和Dai等<sup>[18]</sup>均基于系统动力学模型进行建模,而后分别利用神经网络模型和元胞自动机-马尔科夫(CA-Markov)模型等方法对关键变量进行预测,进而评估资源环境承载力。基于此,本文将采用系统动力学模型及其耦合模型对资源环境承载力这一复杂系统进行量化与模拟,以提高模型的有效性 with 可靠性。

除模型工具以外,情景构建也是区域发展多方案对比研究需要考虑的重要方面。只有合理的情景预测方案才能为未来的区域发展提供可靠的途径选择支撑。已有研究往往通过自行构建叙事框架来进行预测对比<sup>[18,19]</sup>,而多种差异化情景会导致不同区域、时段的研究结论难以实现统一和衔接分析<sup>[20]</sup>。政府间气候变化专门委员会于2010年推出共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs),用以定量描述气候变化与社会经济发展路径之间的关系,反映未来社会面临的气候变化适应和减缓挑战。目前,共享社会经济路径已被广泛应用于土地覆被变化<sup>[21]</sup>、能源消费和碳排放<sup>[22,23]</sup>、景观格局变化<sup>[24]</sup>、中国人口分布变化模拟<sup>[25]</sup>等人地关系地域系统的诸多领域,但尚未被引入资源环境承载力模拟研究当中。为此,本文将共享社会经济路径与系统动力学模型相结合,以探索共享

2023年10月

社会经济路径在资源环境承载力预测中的应用潜力,从而为统一、可比的多情景区域发展模拟提供可行框架。

兰州-西宁城市群(简称“兰西城市群”)作为中国十九大城市群之一,地处青藏高原与黄土高原的交界地带,是中国西北地区的核心增长极,在国家向西开放格局、国土安全和生态安全大局中具有不可替代的作用。然而,兰西城市群生态环境本底脆弱,近年来的快速工业化与城镇化进程导致资源短缺和环境污染问题凸显。因此,根据资源环境承载力构建与之相适应的城镇发展格局,是兰西城市群实现可持续发展的必由之路和迫切需求。为此,本文以兰西城市群为研究案例区,构建了一套基于多模型和多情景耦合分析的资源环境承载力研究框架(图1)。具体而言,本文将统筹考虑资源环境系

统与社会经济系统之间的交互反馈过程,综合利用系统动力学模型、元胞自动机-马尔科夫模型等方法工具,科学评估兰西城市群资源环境承载力的弹性区间和状态类型,并基于共享社会经济路径构建未来发展的多种可能情景,对该地区资源环境承载力进行预测和对比,进而为城镇规模调控和发展路径选择提供科学依据。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 弹性区间测度和承载状态判定

由于水资源、土地资源、环境、生态和能源是资源环境系统中的五大基本要素,因此本文主要基于这5项单要素承载力(依次记为 $C_i, i=1, 2, 3, 4, 5$ )来测算资源环境综合承载力的弹性区间。考虑到资源环境要素之间的权衡协同作用,当两两要素之

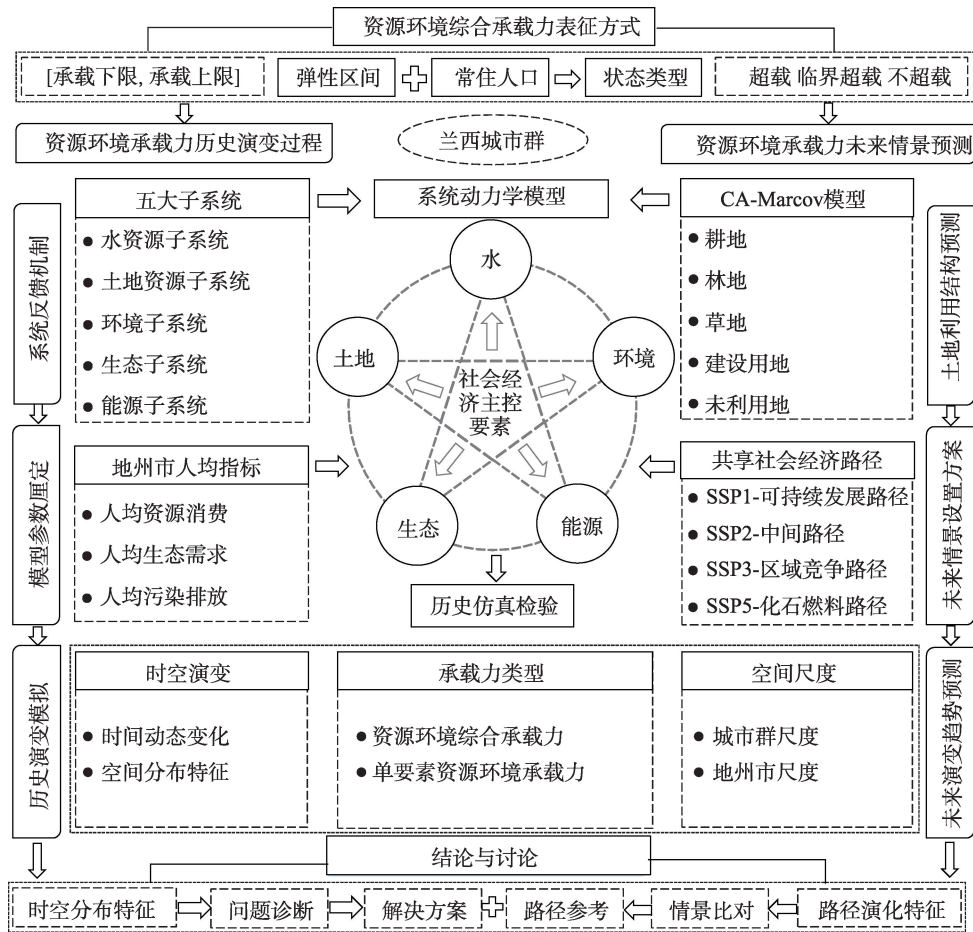


图1 技术路线图

Figure 1 Technological roadmap of this study

间达到完全协同(即不存在权衡)的理想状态时,5项单要素承载力具有相等的权重( $\lambda$ ),将单要素承载力的等权求和结果视为资源环境综合承载力弹性区间的上限( $MAX_C$ )。若考虑实际情况中各项要素的不均等效应,对约束作用越强的要素赋予越高的权重( $\rho_i$ ),那么这种变权求和结果即为资源环境综合承载力弹性区间的下限( $MIN_C$ )。因此,资源环境综合承载力弹性区间可以记为 $[MIN_C, MAX_C]$ ,具体表达式如下:

$$MAX_C = \sum_{i=1}^5 (\lambda \times C_i), \lambda = \frac{1}{5} \quad (1)$$

$$MIN_C = \sum_{i=1}^5 (\rho_i \times C_i) \quad (2)$$

$$\rho_i = \frac{\frac{\tau}{C_i}}{\sum_{i=1}^5 \left( \frac{\tau}{C_i} \right)}, \tau = \sum_{i=1}^5 C_i \quad (3)$$

首先,本文将通过测算各类资源的最大可供量和环境对污染物的最大负载量,并根据各类资源的人均消费标准和人均污染物排放标准,计算得出各类资源环境要素所能承载的最大人口规模,即单要素资源环境承载力;然后,按上述公式计算资源环境综合承载力的弹性区间,继而根据常住人口( $POP$ )和弹性区间之间的数量关系判断该地区的资源环境承载状态。具体而言可划分为3种状态类型:当 $POP \leq MIN_C$ 时,处于不超载状态;当 $MIN_C < POP < MAX_C$ 时,处于临界超载状态;当 $POP \geq MAX_C$ 时,处于超载状态。

### 2.1.2 系统动力学模型构建

#### (1) 系统反馈机制

依据前文分析,本文将资源环境综合承载力这一复杂巨系统解构为水资源承载力、土地资源承载力、环境承载力、生态承载力和能源承载力五大子系统,各子系统之中存在着自然要素和社会经济要素的复杂交互关联,而各子系统之间则以社会经济主控要素为媒介,产生直接或间接联系。这五大子系统及其要素关联是本文对资源环境综合承载力的精炼表达,也是构建系统动力学模型的边界所在。该模型的构建和运行均在Vensim软件中完成,限于篇幅本文主要阐述模型结构与核心反馈机制,系统动力学流图见图2。

水资源承载力子系统主要包括水资源供给与需求两大部分,在水资源供给部分,通过可供水量( $S_{water}$ )与人均综合用水量标准( $P_{water}$ )的比值来量化水资源可承载人口( $C_{water}$ )。参考曹祺文等<sup>[19]</sup>的做法, $S_{water}$ 由可利用水资源量 $W_{available}$ 、污水回用量 $W_{reuse}$ 、境外调水量 $W_{transfer}$ 和雨水集蓄量 $W_{rain}$ 共4个部分组成。其中, $W_{available}$ 基于水资源总量 $W_{total}$ 和可利用水资源系数 $\alpha$ 得到; $W_{reuse}$ 则取决于污水排放总量 $W_{pollution}$ 和污水回用率 $\beta$ ,这里的 $W_{pollution}$ 来源于生活污水 $W_{dom\_pollution}$ 和工业废水 $W_{ind\_pollution}$ 两方面。在水资源需求部分,用水总量 $W_{consumption}$ 由农业用水量 $W_{agriculture}$ 、工业用水量 $W_{industry}$ 、生活用水量 $W_{domestic}$ 和生态环境用水量 $W_{eco-environment}$ 共4个部分组成。主要表达式如下:

$$C_{water} = \frac{S_{water}}{P_{water}} = \frac{W_{available} + W_{transfer} + W_{reuse} + W_{rain}}{P_{water}} \quad (4)$$

$$W_{available} = W_{total} \times \alpha \quad (5)$$

$$W_{reuse} = W_{pollution} \times \beta = (W_{dom\_pollution} + W_{ind\_pollution}) \times \beta \quad (6)$$

$$W_{consumption} = W_{agriculture} + W_{industry} + W_{domestic} + W_{eco-environment} \quad (7)$$

土地资源承载力( $C_{land}$ )是指在一定的人均粮食消费标准( $P_{grain}$ )下,粮食可供量( $S_{grain}$ )能够承载的最大人口数量。其中, $S_{grain}$ 包括本地粮食产量 $G_{local}$ 和进口量 $G_{outer}$ ,前者基于粮食作物播种面积 $A_{grain}$ 和粮食单产 $Y_{grain}$ 计算得到,后者利用粮食自给率 $\gamma$ 进行表征。主要表达式如下:

$$C_{land} = \frac{S_{grain}}{P_{grain}} \quad (8)$$

$$S_{grain} = \frac{G_{local}}{\gamma} = \frac{A_{grain} \times Y_{grain}}{\gamma} \quad (9)$$

环境承载力( $C_{environment}$ )子系统主要由三部分组成,即水环境承载力( $C_{wat\_env}$ )、大气环境承载力( $C_{atm\_env}$ )和固体废弃物环境承载力( $C_{sol\_env}$ ),其中大气环境采用典型空气污染物工业 $SO_2$ 进行测度。参考Bao等<sup>[6]</sup>的处理方式,第 $j$ 种( $j=1, 2, 3$ )环境承载力 $C_{j\_env}$ 通过自然界允许排放的最大污染量 $MAX_{j\_discharge}$ 和人为处理量 $V_{j\_treatment}$ 之和与人均污染

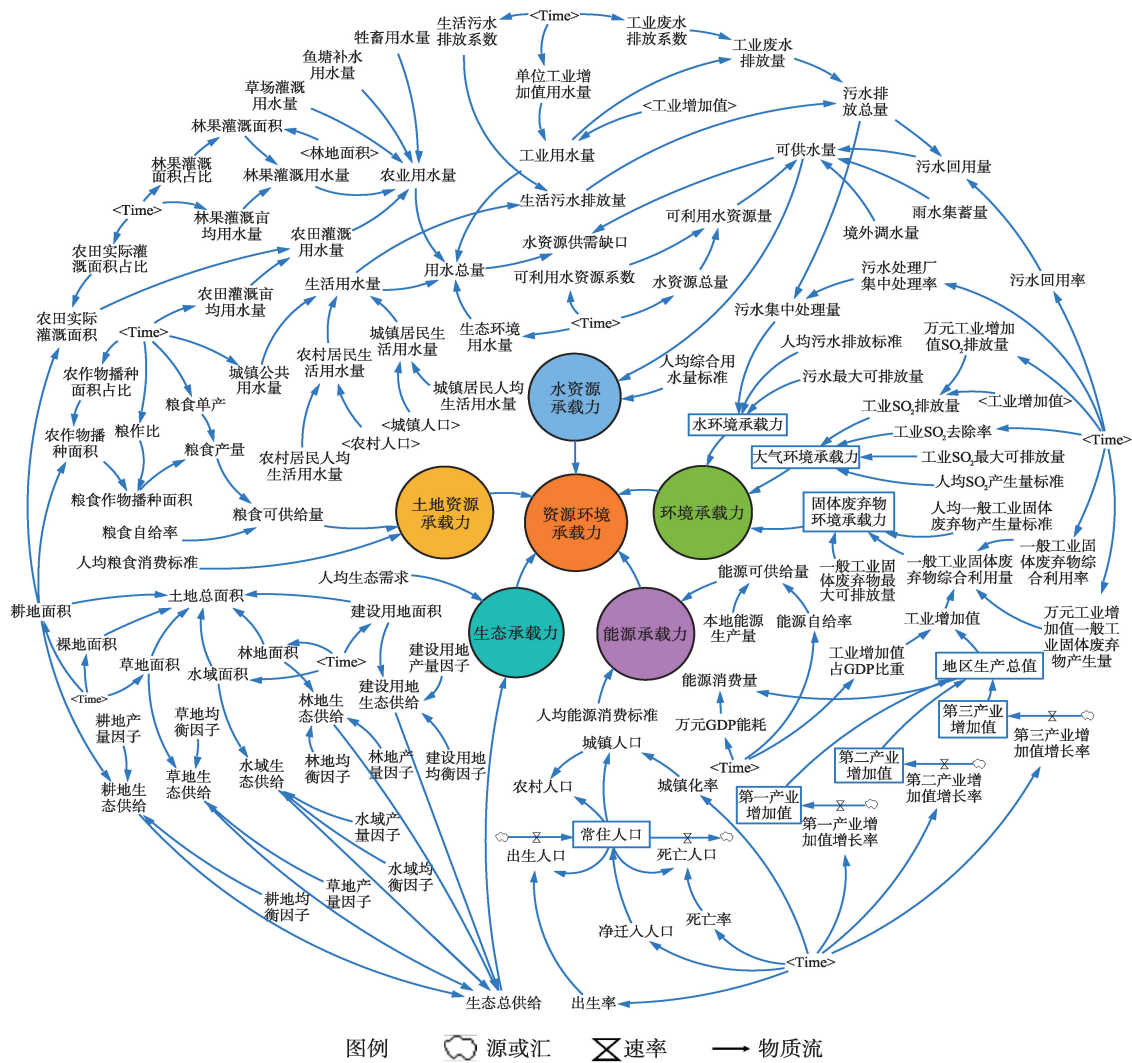


图2 资源环境承载力的系统动力学模型流图

Figure 2 Flow diagram for the system dynamic model of resources and environmental carrying capacity

物排放量标准  $P_{j\_pollution}$  的比值来测算。假定观测年份的环境质量不能低于某一历史达标年份的水平, 利用该历史年份的环境污染排放量来表征自然界允许排放的最大污染量。主要表达式如下:

$$C_{environment} = \frac{C_{wat\_env} + C_{atm\_env} + C_{sol\_env}}{3} \quad (10)$$

$$C_{j\_env} = \frac{MAX_j\_discharge + V_j\_treatment}{P_{j\_pollution}} \quad (11)$$

在生态承载力子系统中, 利用生态总供给 ( $S_{ecology}$ ) 与人均生态需求标准 ( $P_{ecology}$ ) 的比值来表征生态可承载人口 ( $C_{ecology}$ )。根据生态足迹理论, 利用均衡因子  $\delta_m$  和产量因子  $\epsilon_m$  将耕地、草地、水

域、林地、建设用地5类用地面积  $A_m$  转化为相应具有全球平均生产力的生态产品供给, 其中需预留12%的供给空间给生物多样性保护。表达式如下:

$$C_{ecology} = \frac{S_{ecology} \times (1 - 12\%)}{P_{ecology}} \quad (12)$$

$$S_{ecology} = \sum_{m=1}^5 (\delta_m \times \epsilon_m \times A_m) \quad (13)$$

能源承载力子系统包括能源供给与消费两部分。能源可承载人口 ( $C_{energy}$ ) 为在一定的人均能源消费标准 ( $P_{energy}$ ) 下, 能源可供给 ( $S_{energy}$ ) 所能支撑和保障的最大人口数量。其中,  $S_{energy}$  为本地能源生产量  $E_{local}$  与进口量的总和, 进口量由能源自给率

$\theta$  表征。能源消费量 ( $E_{consumption}$ ) 则取决于地区生产总值  $TGDP$  和万元 GDP 能耗  $\mu$ 。主要表达式如下:

$$C_{energy} = \frac{S_{energy}}{P_{energy}} = \frac{E_{local}}{P_{energy}} \quad (14)$$

$$E_{consumption} = TGDP \times \mu \quad (15)$$

社会经济主控要素包括人口要素和经济要素, 常住人口和第一、二、三产业增加值均为水平变量, 通过构建积分函数进行计算。第  $t$  年的常住人口  $POP$  根据常住人口初始值  $POP_0$ 、出生人口  $POP_{newborn}$ 、死亡人口  $POP_{death}$  和净迁入人口  $POP_{net\_immigration}$  进行计算。第  $n$  产业增加值  $VALUE_n$  基于其初始值  $VALUE_{n0}$  和增长量  $\Delta VALUE_n$  进行计算, 三次产业增加值之和即为地区生产总值。主要表达式如下:

$$POP = \text{INTEG}(POP_{newborn} - POP_{death} + POP_{net\_immigration}, POP_0) \quad (16)$$

$$TGDP = \sum_{n=1}^3 VALUE_n = \sum_{n=1}^3 \text{INTEG}(\Delta VALUE_n, VALUE_{n0}) \quad (17)$$

(2) 模型参数厘定

系统动力学反馈机制中的人均指标, 包括人均综合用水量标准、人均粮食消费标准、人均污水排放标准、人均  $SO_2$  产生量标准、人均一般工业固体废物产生量标准、人均生态需求标准、人均能源消费标准等, 主要根据现状值、多年平均值、规划文件、世界/国家/地方标准等来确定。基准情景下兰西城市群各地州市人均标准值见表 1。

2.1.3 资源环境承载力未来情景预测

(1) 土地利用结构预测

本文选择元胞自动机-马尔科夫模型对研究区未来土地利用结构进行预测, 该模型由元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 和马尔科夫 (Markov) 模型有机结合而成。它通过将具有分布连续性的空间元素加入马尔科夫链的分析过程来实现土地利用预测模拟, 可以同时发挥元胞自动机模型模拟空间变化和马尔科夫模型长期预测的优势, 能在空间和数量两方面更好地进行土地利用的时空模拟预测。

元胞自动机由时间、空间、状态都离散的元胞为基本组成单元, 侧重于不同元胞之间的相互作用, 通过某一元胞转换规则来模拟系统的时空演化过程, 其基本表达式如下<sup>[26]</sup>:

$$S_{uv}^{t+1} = f(S_{uv}^t, N) \quad (18)$$

式中:  $S_{uv}^t$  和  $S_{uv}^{t+1}$  分别为第  $uv$  个元胞在  $t$  和  $t+1$  时刻的状态;  $f$  为元胞转换规则;  $N$  为元胞邻域。

马尔科夫模型假定随机过程中某时刻的状态只取决它上一个时刻的状态, 从而利用系统的初始状态与状态转移概率来预测未来状态, 是一种长期预测方法, 可以表达为<sup>[27]</sup>:

$$S^{t+1} = S^t \times P \quad (19)$$

式中:  $S^t$  和  $S^{t+1}$  为系统在  $t$  和  $t+1$  时刻的状态;  $P$  为该系统从  $t$  到  $t+1$  时刻的状态转移概率。

(2) 未来情景设置及其他要素预测

本文基于共享社会经济路径设计未来发展情景, 主要包括 5 种情景: SSP1、SSP2、SSP3、SSP4 和

表 1 基准情景下兰西城市群各地州市人均标准值

Table 1 Per capita indicator values of prefecture-level administrative units in the Lanzhou-Xining urban agglomeration under the benchmark scenario

地区	综合用水量标准/(m <sup>3</sup> /人)	粮食消费标准/(kg/人)	水污染排放量标准/(t/人)	大气污染排放量标准/(kg/人)	固废排放量标准/(t/人)	生态需求标准/(ghm <sup>2</sup> /人)	能源消费标准/(t/人)
兰州市	411.96	285.83	50.74	32.86	0.96	0.18	3.45
白银市	533.41	534.97	28.07	38.05	3.02	0.68	3.15
定西市	144.10	334.15	4.11	22.91	0.09	0.53	1.55
临夏回族自治州	197.92	312.86	14.23	5.32	0.05	0.27	1.37
西宁市	210.00	197.12	64.05	5.24	1.33	0.20	5.05
海东市	300.00	450.00	31.22	2.33	0.29	0.61	3.53
海北藏族自治州	420.00	492.77	18.96	5.27	0.39	0.73	4.31
海南藏族自治州	535.55	679.84	21.23	0.41	1.38	0.70	4.06
黄南藏族自治州	206.44	235.26	10.62	0.43	0.15	0.69	3.37

2023年10月

SSP5。Riahi等<sup>[28]</sup>详细阐述了各类情景的语境和含义。其中,SSP4为分化路径,对未来社会经济发展较为悲观,认为区域发展的不均衡程度会逐渐加深,这不符合兰西城市群作为国家重点开发区域的未来预期,故本文未作考虑。

SSP2为中间路径,它所描述的区域发展在社会、经济、技术等各方面都具有高度的路径依赖特性,故本文选择SSP2作为不同情景间对比分析的基准,突出资源环境承载力演变过程的路径依赖特征。在SSP2路径下,除采用CA-Marcov模型预测未来土地利用结构以外,对于水资源、环境、生态和能源子系统中的关键变量,根据系统的结构特点、参数本身的含义和参数之间的关联特征,主要通过算术平均、趋势外推、灰色预测、表函数、规划资料等多种方法确定模型参数<sup>[29]</sup>。基本原则是:随时间变化不明显但有一定波动的参数根据历史数据平均值确定;随时间变化明显但没有规律的参数通过GM(1,1)模型进行灰色预测;随时间变化明显且有较强路径依赖特性的参数通过趋势外推方法确定;重要发展参数依据规划目标确定,包括甘肃、青海两省及其下辖地州市的“十四五”发展规划、《兰州-西宁城市群发展规划》及其实施方案等。

SSP1为可持续发展路径,是一种致力于提升人类整体福祉的包容性发展模式。该情景下,经济发展具有强劲动力,人口总量下降。可持续消费理念的渗透和清洁技术的革新带来较低的资源消耗、化石能源依赖度以及全面提升的生态环境质量。因此,该情景下的人均消费标准、人均排放标准、污染排放强度和资源消耗强度均在SSP2基础上有所下降,同时污染治理强度有所提高。基于区域协作的发展模式使得关键资源的流通性升高,因此设定能源和粮食自给率在SSP2基础上略微下降。

SSP3为区域竞争路径,是社会必须避免或准备应对的最坏发展方向。该情景下地区竞争和冲突加剧,社会将牺牲全面的发展,更多关注区域安全问题,尤其是能源和粮食安全,因此该情景下的能源与粮食将处于高度自给状态。人均消费标准、人均排放标准、污染排放强度和资源消耗强度将高于SSP2情景,同时污染治理强度下降,生态环境质量

持续恶化,经济增长和城镇化进程滞缓,人口增速显著提高。

SSP5为化石燃料发展路径,是一种高度依赖化石燃料来推动高速增长和城镇化的模式。尽管社会普遍采用资源和能源密集型的生活方式,但局部环境问题依然得到成功治理。因此人均消费标准、污染治理强度和资源消耗强度将在SSP2情景的基础上提高,人均排放标准和污染排放强度将有所降低。高度一体化的市场和参与性社会带来快速的技术进步和人力资本发展,人口增速放缓。

依据上述分析,本文参考语境涵义、研究区具体情况和其他相关研究<sup>[23,28,30]</sup>对SSP1、SSP3、SSP5情景下系统动力学模型中的关键参数进行本地化设置,在SSP2的基础上进行相应比例上浮或下调,具体方案见表2。

## 2.2 数据来源

根据《兰州-西宁城市群发展规划》,兰西城市群空间范围的最小组成单元为区县级行政单元,鉴于数据可获得性,本文将研究尺度统一上升至地级行政单元,共包括兰州市、白银市、定西市、临夏回族自治州、西宁市、海东市、海北藏族自治州、海南藏族自治州和黄南藏族自治州9个地州市。鉴于国民经济和社会发展远景目标规划期为2035年,为更好地服务于规划目标,本文将历史时段设置为2000—2020年,预测时段设置为2021—2035年。

水资源相关数据来源于甘肃省与青海省的历年水资源公报;土地利用遥感数据来源于欧洲空间局(ESACCI, <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>),分辨率为300 m×300 m;土地利用统计数据和粮食产量数据来源于省级统计年鉴与地级国民经济与社会发展统计公报;环境数据来源于省级统计年鉴、《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》,少量工业污染缺失数据利用省级尺度工业污染排放数据和地级尺度工业增加值数据推算获得,少量污染物处理率缺失数据利用趋势外推法计算获得;各用地类型的均衡因子和产量因子来源于刘某承等<sup>[31,32]</sup>的研究成果;能源数据来源于Chen等<sup>[33]</sup>的研究成果;人口数据来源于历次人口普查公报和历年统计年鉴;GDP和各产业增加值等经

表2 SSPs情景下系统动力学模型参数设置方案

Table 2 Parameter setting scheme of the system dynamic model under different shared socioeconomic pathway (SSP) scenarios

指标类型	具体参数	SSP1	SSP3	SSP5
人均消费标准	人均综合用水量标准、人均粮食消费标准、人均生态需求标准	-5%	+10%	+8%
	人均能源消费标准	-8%	+5%	+10%
人均排放标准	人均污水排放标准、人均SO <sub>2</sub> 产生量标准、人均一般工业固体废物产生量标准	-5%	+5%	-2%
污染治理强度	污水处理厂集中处理率、污水回用率、工业SO <sub>2</sub> 去除率、一般工业固体废物综合利用率、生态环境用水量	+5%	-5%	+5%
污染排放强度	工业废水排放系数、生活污水排放系数、万元工业增加值SO <sub>2</sub> 排放量、万元工业增加值一般工业固体废物产生量	-5%	+5%	-2%
资源消耗强度	万元GDP能耗、单位工业增加值用水量	-5%	+5%	+2%
社会经济发展	第一、二、三产业增加值增长率	+5%	-5%	+5%
	人口出生率	-8‰	+8‰	-8‰
	人口死亡率	-2‰	+3‰	-3‰
	城镇化率	+5%	-5%	+5%
区域发展安全	能源自给率、粮食自给率	-5%	+5%	0
	粮食单产	+5%	-5%	+3%

注:表中数字为在SSP2的基础上上浮或下调的比例。

济数据来源于历年统计年鉴,且均以2000年为基准换算为可比价格。

### 3 结果与分析

本文对资源环境承载力系统动力学模型进行了历史仿真检验,结果显示,各项关键变量相对误差的多年平均值均小于10%,表明该模型具有较高解释力和可信度,可以较好地反映研究区资源环境承载力状况。基于模型计算结果,下文将对兰西城市群资源环境承载力的历史演变过程和未来发展趋势进行分析。

#### 3.1 兰西城市群资源环境承载力历史演变过程

图3为2000—2020年兰西城市群资源环境承载力与常住人口的变化。在兰西城市群尺度上,资源环境综合承载力弹性区间由2000年的[1167, 1367]万人变化至2020年的[2049, 2069]万人,常住人口由2000年的1363万增长至2020年的1540万。现状常住人口距弹性区间下限仍有500万人左右的空间,这意味着兰西城市群依然具有吸纳自身增长人口和接收外来迁入人口的空间,符合其作为引导培育型城市群的客观定位。2006年,兰西城市群的资源环境承载状态实现了由临界超载向不超载的状态转变,城市群整体层面的人地矛盾问题得到了有效纾解。在地级行政区尺度上,各行政区资

源环境力弹性区间的上下限均有所提升,承载状态有所好转。具体而言,兰州市和黄南藏族自治州常年稳定在不超载状态,白银市、定西市、临夏回族自治州、西宁市和海东市均在2010年前后由超载状态转为不超载状态,海北藏族自治州和海南藏族自治州则在2004年前后由临界超载状态变为不超载状态。

就单要素资源环境承载力而言,兰西城市群生态承载力长期稳定在2240万人左右,水资源承载力由1703万人稳定增长至2373万人,这两项要素的承载压力在城市群内部均呈现两极化的分布态势,西部三大自治州明显低于其他地区。具体而言,由于海北、海南和黄南三大藏族自治州位于或邻近三江源地区,水资源总量及其开发潜力巨大,同时是中国重要的生态安全屏障,因此这3个自治州具有较高的水资源承载力和生态承载力,同时人口稀少,从而导致水资源承载压力和生态承载压力小。而其他地区均在不同程度上存在着水资源短缺问题,尤其是临夏回族自治州和西宁市常年处于水资源超载状态,同时生态安全问题不容忽视。就土地资源承载力而言,大部分地区实现了由超载向可承载的转变,对于兰州市和西宁市,土地资源的粮食供给能力始终有所盈余,但近年来略有下降。环境



2023年10月

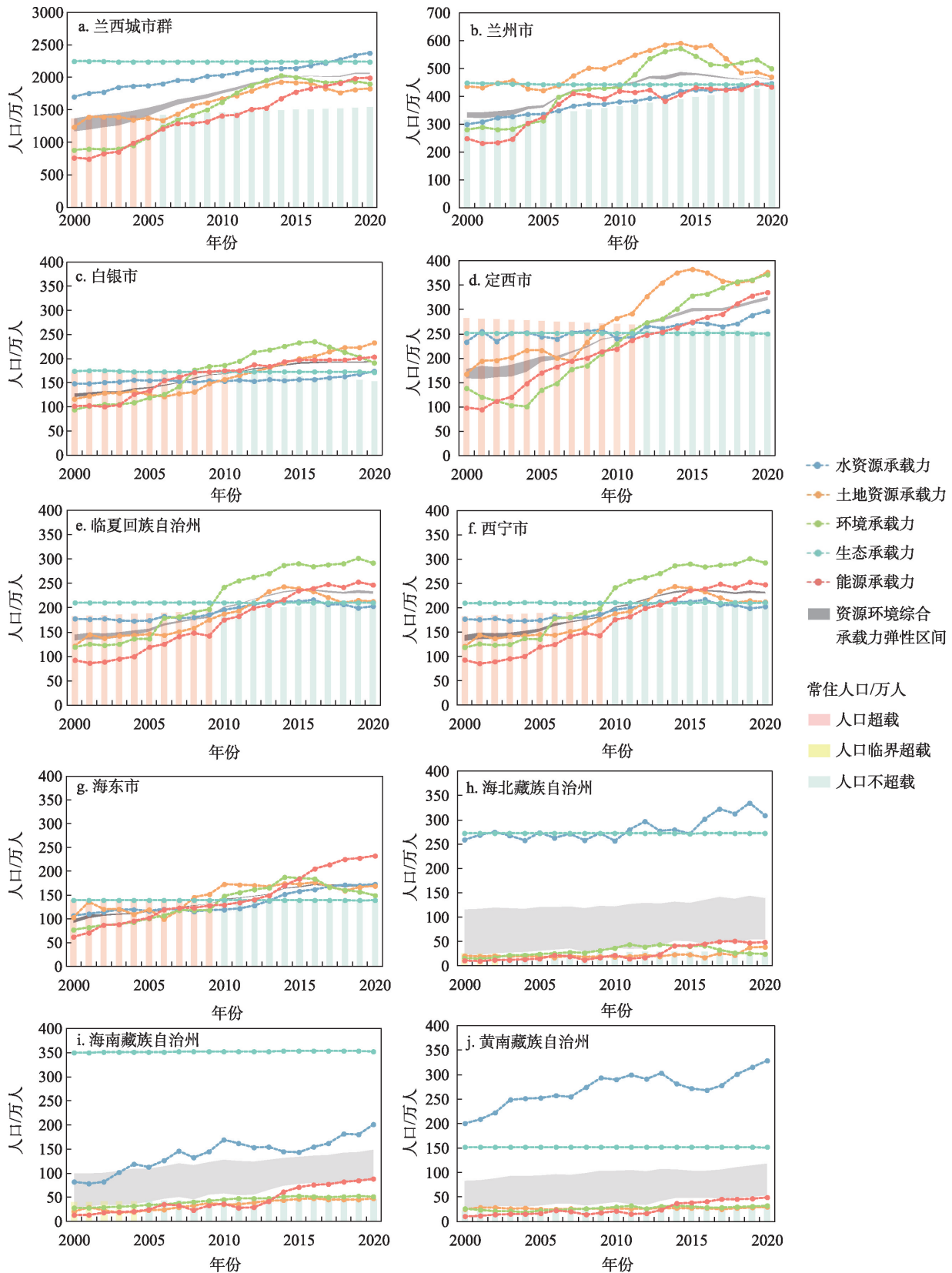


图3 2000—2020年兰西城市群资源环境承载力与常住人口的时间演变

Figure 3 Temporal dynamics of resources and environmental carrying capacity and permanent population in the Lanzhou-Xining urban agglomeration, 2000-2020

承载力在所有地区均呈现波动上升的态势,由前期的超载状态转向后期的盈余状态,表明兰西城市群的环境治理卓有成效。得益于水、光、风能资源的富足和能源输送通道的建设,兰西城市群新能源产业迅猛发展,逐步发展成为国家清洁能源基地,因此,所有地州市均实现了能源承载力的提升,从超载迈向盈余。

### 3.2 兰西城市群资源环境承载力未来情景预测

图4展示了基于CA-Marcov模型的兰西城市群未来土地利用预测结果,在未来年份耕地和林地将持续流失,年均收缩速度分别为-0.16%和-0.27%,而草地、建设用地、水域和未利用地将有所扩张,其中建设用地面积将以年均2.39%的速度快速增长。图5和图6分别展示了不同SSP情景下兰西城市群和其下辖地州市资源环境承载力的未来演变。对

于兰西城市群而言,在所有情景中,生态承载力均略微下降,而水资源、土地资源 and 能源承载力均有不同程度的提升,同时资源环境综合承载力弹性区间的范围均有所扩大,表明其未来不确定性会随着预测时间的延长而增强。在相同时间截面下,SSP1情景中的水资源、土地资源、生态和能源承载力均高于其他情景,2035年其资源环境承载力弹性区间和常住人口将分别达到[2770, 2804]万人和1600万人,是承载区间最高同时人口增长率(0.14%)最低的情景。此情景下资源环境承载压力最小,体现了区域发展的可持续转向为人类社会带来的积极影响。SSP2情景下,2035年弹性区间和常住人口将分别达到[2532, 2555]万人和1724万人。该情景的资源利用、生态保护与环境治理维持在常规水平,常住人口年均增长0.75%,增长动力居中。SSP3是各

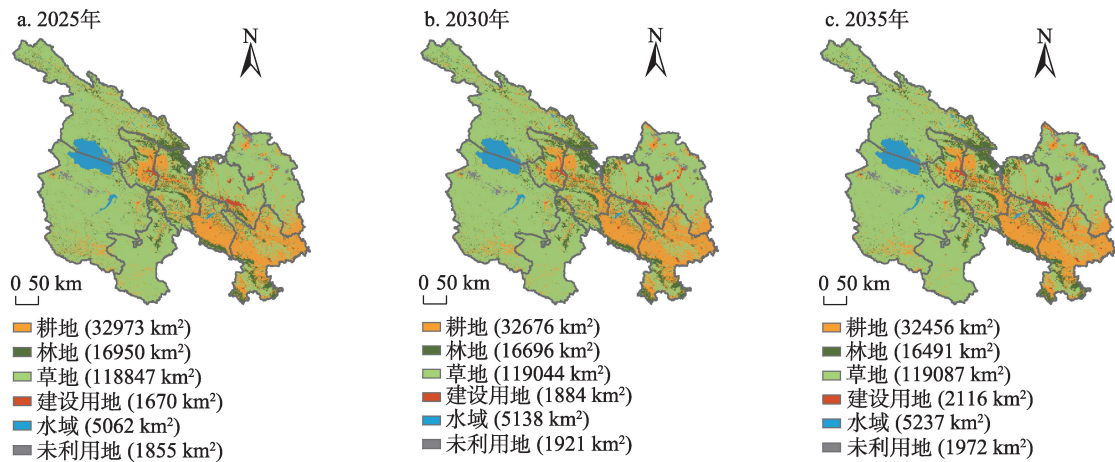


图4 兰西城市群土地利用结构的未来演变

Figure 4 Future dynamics of land use structure in the Lanzhou-Xining urban agglomeration

注: 括号中为各类用地的面积。

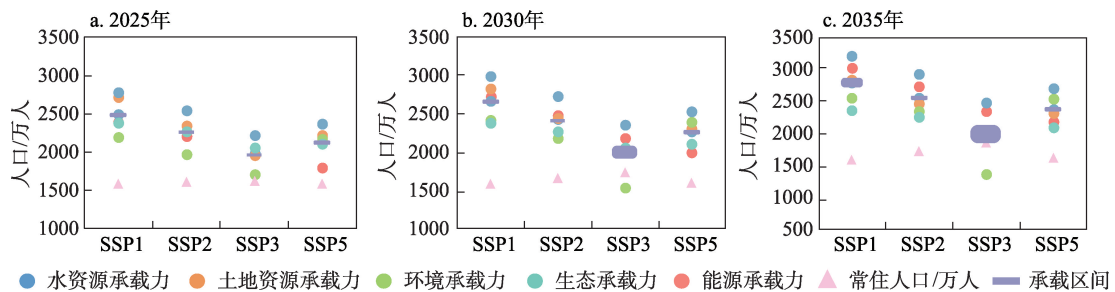


图5 不同SSP情景下兰西城市群资源环境承载力的未来演变

Figure 5 Future dynamics of resources and environmental carrying capacity in the Lanzhou-Xining urban agglomeration under different shared socioeconomic pathway (SSP) scenarios

2023年10月

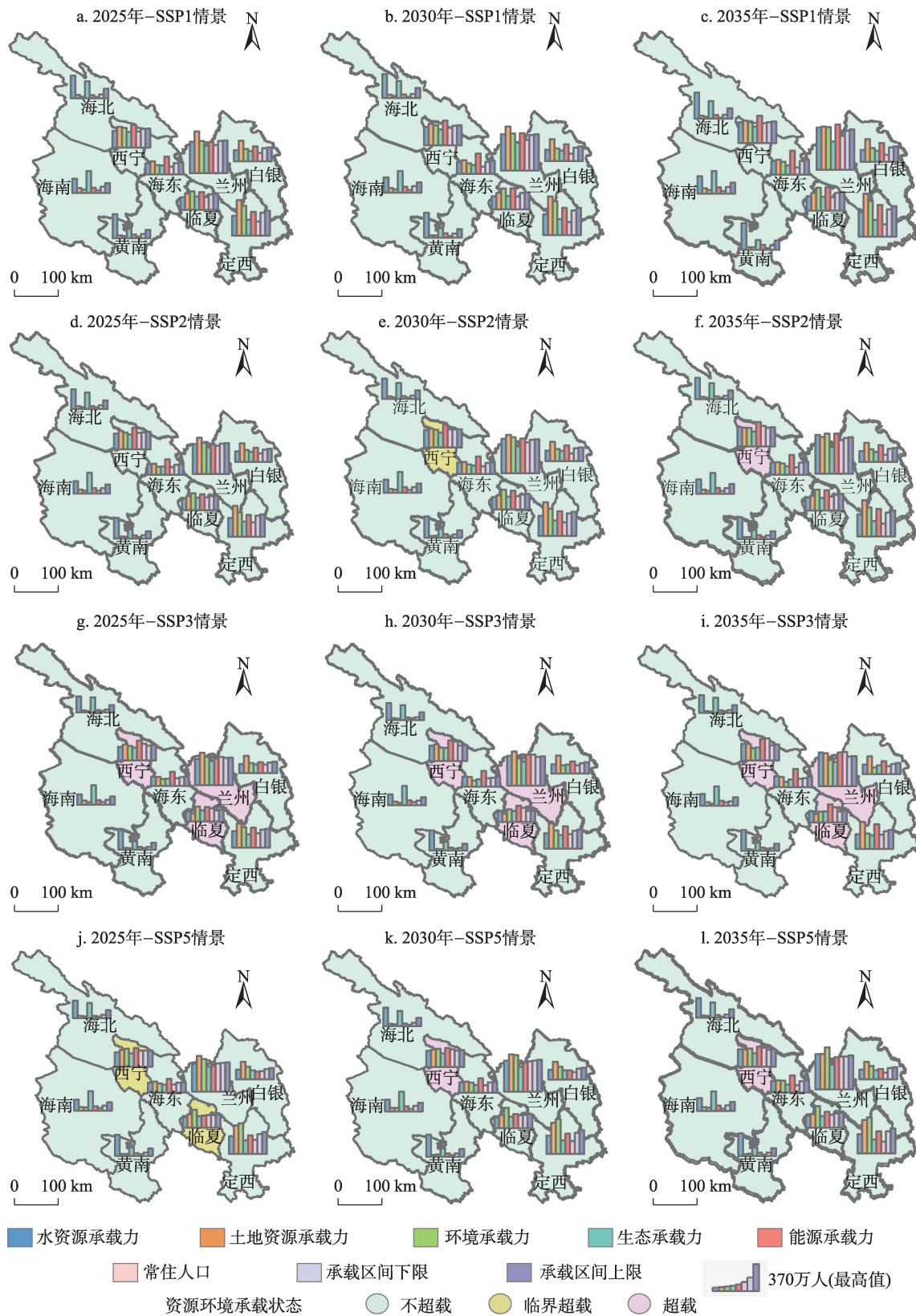


图6 不同 SSP 情景下兰西城市群地级行政区资源环境承载力的未来演变

Figure 6 Future dynamics of resources and environmental carrying capacity of prefecture-level administrative units in the Lanzhou-Xining urban agglomeration under different shared socioeconomic pathway (SSP) scenarios

项单要素承载力和承载区间最低且常住人口最多的情景。环境承载力是该情景里的主要短板,将以年均-2.18%的速度持续下降。该情景下区域发展对粮食和能源安全的高度重视使得土地和能源的承载风险相对较低,但技术投入的减少和环保力度的削弱导致城市群环境状况岌岌可危。在SSP5情景下,由于社会经济发展对于化石能源有高度依赖性,因此能源承载力在所有情景中最低,同时得益于环境问题的成功治理,环境承载力将居于首位。常住人口以年均0.23%的速度缓慢增长,到2035年将到达1619万人,相比于[2354, 2375]万人的承载区间的下限值依然有700万人左右的安全距离。

在地级行政区层面上,SSP1情景下兰西城市群的资源环境承载状态将呈现全域可承载的空间均衡格局,其余情景下则呈现“中间差外围优”的核心-边缘式空间分布格局。SSP1情景下,所有地区均处于不超载状态,除兰州和西宁以外,其余地州市的人口均出现下降,同时由于承载力提升较快,使得各地区承载盈余空间持续扩大。SSP2情景下,兰州市、西宁市、临夏回族自治州、海南藏族自治州和黔南藏族自治州的人口将有所增长,其余地州市人口则出现下降。除西宁市承载状态逐步恶化以外,其他地区长期处于不超载的安全状态。SSP3情景下,白银市和定西市人口略微下降,其他地区人口均有较快增长。兰州市、西宁市和临夏回族自治州将长期面临超载风险,环境和生态是最为普遍的短板要素。SSP5情景下,仅兰州和西宁人口增长显著,临夏回族自治州人口基本保持稳定,其余地区人口均有所降低。西宁市承载状态逐步恶化,由临界超载转向超载,临夏回族自治州则由临界超载向不超载演变。

## 4 讨论

本文从复杂系统动态演化的视角出发,构建了一套基于多模型和多情景耦合的资源环境承载力系统性分析框架,实现了从弹性区间测算、状态类型判定、时空格局演变到未来发展预测的全过程解析。首先,传统的资源环境承载力研究多以人口绝对规模作为静态刚性约束,而忽略了承载力本身的动态性和不确定性特征。本文首次尝试以人口弹

性区间形式对传统表征形式进行改进,可以为人口宏观调控提供更具弹性和实操性的政策建议。其次,系统动力学模型常被应用于以往的资源环境承载力测算当中。相比于单一模型,本文所构建的系统动力学模型与元胞自动机-马尔科夫模型的耦合模型可以提高模拟精度和预测效果。最后,资源环境承载力预测是制定适应性和动态性政策的关键所在,以往研究常自行构建叙事框架进行多情景预测,导致难以实现统一和衔接分析,本文则通过共享社会经济路径的在地化运用提供了一套可比的资源环境承载力未来多情景预测方案。

预测结果表明西宁市、临夏回族自治州和兰州市将面临最高的资源环境承载风险,对此,应当从城镇发展格局构建和承载潜力动态提升两方面合力解决。首先,应当根据资源环境承载力合理调控城镇人口规模,构建与之相适应的城镇规模体系,促进大中小城市和小城镇协调发展。从历史趋势来看,仅两大省会城市具备一定的人口增长基数与动力,近半数地区属于收缩型城市,人口增长乏力。因此,应当适度限制高承载风险区的城镇规模扩张,同时提升高承载潜力区的人口吸引力。其次,在承载潜力提升上,应当以西宁市、临夏回族自治州和兰州市为重点区域,一方面需要积极盘活存量资源,挖潜利用效率;另一方面应当优化资源的跨区配置以缓解局地供需矛盾,实现增量扩容。此外,还需要积极应对高承载风险区的交通拥堵、环境恶化、公共资源短缺等“大城市病”问题,以提高承载质量和抗风险能力。

基于共享社会经济路径的未来情景预测结果可以给兰西城市群的可持续发展提供有益的路径参考。相比而言,基于SSP1的发展路径较为可取,能够在保证较快经济增长的同时实现资源的节约集约利用和生态环境质量的全面提高,使得城镇发展规模与资源环境承载力相协调,并促使资源环境承载力得到全方位提升。与之形成鲜明对比,SSP3情景导向下的资源环境承载力出现全方位下滑,生态环境的破坏与不平等问题深化会大幅降低居民福祉。SSP5情景虽然可以实现经济的高速增长和环境承载力的快速提升,但其资源和能源密集型

2023年10月

的发展模式会降低其他类型的单要素承载力,不利于整体的可持续发展。值得注意的是,尽管SSP1是4种共享社会经济路径中的相对优选路径,但也将带来常住人口的持续下降和人口老龄化的加速,因此,应当对其进行进一步优化,通过采取生育支持措施来推动人口增长,为区域发展注入源源不断的活力。

## 5 结论

本文所构建的基于多模型和多情景耦合分析的资源环境承载力研究框架具有可行性,该框架明确界定了资源环境承载力弹性区间和状态类型的测定方法,详细阐释了系统动力学及其耦合模型的构建流程以及未来发展情景的构建依据,可以为城市群地区的资源环境承载力评价提供通用模板。以兰西城市群为案例区,本文得到以下4点主要结论:

(1)对于兰西城市群而言,其资源环境承载力在2000—2020年有所提升,承载弹性区间由[1167, 1367]变化至[2049, 2069](单位:万人),承载状态由临界超载优化为不超载。说明兰西城市群整体层面的人地矛盾已经得到了有效纾解,其作为引导培育型城市群在当前依然具有较大的人口容纳潜力。

(2)2000—2020年,兰西城市群各个地州市的承载状态均有所好转,各项单要素承载力和承载区间基本均呈上升态势,同时体现出显著的空间异质性特征。水资源承载压力和生态承载压力均呈现两极化分布态势,二者在西部三大藏族自治州富富有余,而其他地区则面临超载或临界超载的风险。

(3)兰西城市群资源环境承载力在不同共享社会经济路径下将呈现不同的分异特征。在相同时间截面下,SSP1情景中的水、土地、生态和能源承载力均高于其他情景,同时人口增长率最低;SSP2作为基准情景,其承载力和人口均处于中间水平;SSP3是弹性区间最低且常住人口最多的情景,环境承载力持续下降;在SSP5情景下,能源承载力最低,同时环境承载力将居于首位。

(4)SSP1情景下兰西城市群的资源环境承载状态将呈现全域可承载的空间均衡格局,其余情景下则呈现“中间差外围优”的核心-边缘式空间分布格

局。中心城市西宁在所有情景下都将面临最为严重的超载风险,兰西城市群人口增长热点区与承载潜力区之间将长期存在一定的空间错位。

## 参考文献(References):

- [1] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision [R]. Population Division of the United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2018.
- [2] Berrang-Ford L, Siders A R, Lesnikowski A, et al. A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change[J]. Nature Climate Change, 2021, 11: 989-1000.
- [3] 吕一河, 傅微, 李婷, 等. 区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 130-138. [Lv Y H, Fu W, Li T, et al. Progress and prospects of research on integrated carrying capacity of regional resources and environment[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 130-138.].
- [4] Maltus T R. An Essay on the Principle of Population[M]. London: St Paul's Church-Yard, 1798.
- [5] 牛方曲, 封志明, 刘慧. 资源环境承载力评价方法回顾与展望[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 655-663. [Niu F Q, Feng Z M, Liu H. A review on evaluating methods of regional resources and environment carrying capacity[J]. Resources Science, 2018, 40(4): 655-663.].
- [6] Bao C, Wang H J, Sun S. Comprehensive simulation of resources and environment carrying capacity for urban agglomeration: A system dynamics approach[J]. Ecological Indicators, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108874.
- [7] 封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1475-1489. [Feng Z M, Li P. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1475-1489.].
- [8] 韩冬梅, 汪刚, 田晓喻. 基于短板理论的中国畜禽养殖资源承载风险评估[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2074-2088. [Han D M, Wang G, Tian X Y. Resources carrying risk of livestock and poultry breeding in China based on the short board theory[J]. Resources Science, 2022, 44(10): 2074-2088.].
- [9] 吴浩, 江志猛, 林安琪, 等. 基于隐性-韧性-显性的武汉城市资源环境承载力空间特征[J]. 地理学报, 2021, 76(10): 2439-2457. [Wu H, Jiang Z M, Lin A Q, et al. Analyzing spatial characteristics of urban resource and environment carrying capacity based on Covert-Resilient-Overt: A case study of Wuhan City[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(10): 2439-2457.].
- [10] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395. [Feng Z M, Yang Y Z, Yan H M, et al. A review of resources and environment

- carrying capacity research since the 20th Century: From theory to practice[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379–395.]
- [11] 孙阳, 王佳韡, 伍世代. 近35年中国资源环境承载力评价: 脉络、热点及展望[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(1): 34–58. [Sun Y, Wang J W, Wu S D. Resource and environmental carrying capacity in China for 35 years: Evolution, hotspots, future trend[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(1): 34–58.]
- [12] Liao X, Fang C L, Shu T H. Multifaceted land use change and varied responses of ecological carrying capacity: A case study of Chongqing, China[J]. *Applied Geography*, 2022, DOI: 10.1016/j.apgeog.2022.102806.
- [13] Wang Y C, Du Y W. Evaluation of resources and environmental carrying capacity of marine ranching in China: An integrated life cycle assessment–energy analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159102.
- [14] 王世豪, 黄麟, 徐新良, 等. 特大城市群生态空间及其生态承载状态的时空分异[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 164–181. [Wang S H, Huang L, Xu X L, et al. Spatio-temporal variation characteristics of ecological space and its ecological carrying status in mega-urban agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 164–181.]
- [15] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7048–7060. [Sun C Z, Zhang Z X. Assessment of water ecological footprint size, depth, and spatial pattern in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 7048–7060.]
- [16] Gallagher K S, Zhang F, Orvis R, et al. Assessing the policy gaps for achieving China’s climate targets in the Paris Agreement[J]. *Nature Communications*, 2019, DOI: 10.1038/s41467-019-09159-0.
- [17] Wang S, Xu L, Yang F L, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 1070–1081.
- [18] Dai D, Sun M D, Lv X B, et al. Comprehensive assessment of the water environment carrying capacity based on the spatial system dynamics model, a case study of Yongding River Basin in North China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131137.
- [19] 曹祺文, 鲍超, 顾朝林, 等. 基于水资源约束的中国城镇化SD模型与模拟[J]. *地理研究*, 2019, 38(1): 167–180. [Cao Q W, Bao C, Gu C L, et al. China’s urbanization SD modelling and simulation based on water resource constraints[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 167–180.]
- [20] 李福香, 刘殿锋, 孔雪松, 等. 基于动态模拟视角与共享社会经济路径的多情景县域可持续发展潜力评价[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(4): 684–697. [Li F X, Liu D F, Kong X S, et al. Multi-scenario evaluation of county-scale development potential based on Shared Socioeconomic Pathways and dynamic simulation approach[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2022, 24(4): 684–697.]
- [21] 范泽孟. 基于SSP–RCP不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 228–244. [Fan Z M. Simulation of land cover change in Beijing–Tianjin–Hebei region under different SSP–RCP scenarios[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 228–244.]
- [22] 景丞, 姜彤, 苏布达, 等. 共享社会经济路径在土地利用、能源与碳排放研究的应用[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(3): 397–413. [Jing C, Jiang T, Su B D, et al. Multiple application of shared socioeconomic pathways in land use, energy and carbon emission research[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(3): 397–413.]
- [23] van Vuuren D P, Stehfest E, Gernaat D E H J, et al. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 237–250.
- [24] Liu H, Liu Y X, Wang C X, et al. Landscape pattern change simulations in Tibet based on the combination of the SSP–RCP scenarios[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112783.
- [25] 夏海斌, 刘敏. 基于地理学综合视角的胡焕庸线IPCC复合情景(SSPs–RCPs)模拟和预测[J]. *地理研究*, 2021, 40(10): 2838–2855. [Xia H B, Liu M. Hu Huanyong Line based on geographical synthesis: Simulation and prediction under SSPs–RCPs scenario matrix[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(10): 2838–2855.]
- [26] 岳东霞, 杨超, 江宝骅, 等. 基于CA–Markov模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 1993–2003. [Yue D X, Yang C, Jiang B H, et al. Spatio-temporal pattern prediction of the biocapacity in the Shiyang River Basin on the basis of the CA–Markov model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 1993–2003.]
- [27] 茹少峰, 马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1722–1734. [Ru S F, Ma R H. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1722–1734.]
- [28] Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 153–168.
- [29] 赵莎, 胡最, 郑文武. 中国“胡焕庸线”东西两侧能源消耗空间格局的系统动力学模拟[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(8): 1269–1283. [Zhao S, Hu Z, Zheng W W. System dynamics model–based simulation of energy consumption pattern on the two sides of the

2023年10月

- Huhuanrong Line in China[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(8): 1269–1283.]
- [30] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 等. 多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 697–713. [Liang X Y, Jin X B, Sun R, et al. China's resilience-space for cultivated land protection under the restraint of multi-scenario food security bottom line[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 697–713.]
- [31] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1550–1559. [Liu M C, Li W H. The calculation of China's equivalence factor under ecological footprint mode based on net primary production[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1550–1559.]
- [32] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592–597. [Liu M C, Li W H, Xie G D. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 592–597.]
- [33] Chen J D, Liu J L, Qi J, et al. City- and county-level spatio-temporal energy consumption and efficiency datasets for China from 1997 to 2017[J]. *Scientific Data*, 2022, DOI: 10.1038/s41597-022-01240-6.

## Elastic range measurement of resource and environmental carrying capacity and future scenario analysis: A case study of the Lanzhou–Xining urban agglomeration

XU Mutian<sup>1,2</sup>, BAO Chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] Developing an urban system scale that adapts to the resources and environmental carrying capacity (RECC) is an important foundation for achieving sustainable development of urban agglomerations. Previous studies often employed static and rigid constraints to represent RECC, which were characterized by single absolute values. Such approach does not align with the dynamic and uncertain nature of RECC. To address this issue, the purpose of this study was to measure the elastic ranges and project future scenarios of resources and environmental carrying capacity. [Methods] This study proposed a method for determining the elastic range and status of RECC. A quantitative analytical framework for RECC was constructed by integrating the system dynamic and CA-Markov models. Additionally, the shared socioeconomic pathways (SSPs) provide a series of future scenarios for analyzing RECC. The proposed framework was applied to an empirical study of the Lanzhou–Xining urban agglomeration (LXUA). [Results] (1) From 2000 to 2020, the elastic range of the RECC in the LXUA changed from [11.67, 13.67] million to [20.49, 20.69] million people, and the carrying capacity status type transitioned from critical overload to non-overload. (2) The elastic range of the RECC and the single-factor carrying capacity were basically on the rise in each prefecture-level administrative unit, and presented obvious spatial divergence. (3) From 2021 to 2035, under the SSP1 scenario most of the single-factor carrying capacities will be higher than under the other scenarios, while the population growth rate will be the lowest; As the baseline scenario of SSP2, the elastic range of comprehensive resources and

environmental carrying capacity, each single-factor carrying capacity and the permanent population will be all at the middle level. SSP3 will be the scenario with the lowest elastic range of comprehensive resources and environmental carrying capacity and the largest permanent population; SSP5 will have the lowest energy carrying capacity and the highest environmental carrying capacity. (4) Under the SSP1 scenario, the LXUA will exhibit a balanced pattern of non-overload across the whole region. By contrast, the other scenarios will demonstrate a core-periphery spatial distribution pattern of “poor in the middle and excellent at the periphery”. **[Conclusion]** In the future, based on the SSP1 development path, resources and environmental carrying risks should be addressed from the two aspects of adaptive construction of urban development pattern and dynamic improvement of carrying potential, so as to promote the coordinated development of human-nature relationship.

**Key words:** resources and environmental carrying capacity; elastic range; scenario analysis; system dynamics; shared socioeconomic pathways; CA-Markov model; Lanzhou-Xining urban agglomeration